



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 29 № 3 2026



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 29 No. 3 2026

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2026

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

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., чл.-кор. РАН, ООО «Коннектор Оптикс», 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, PhD, 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. (Phys.-Math.), 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, PhD, 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

Обзорные статьи

Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Фам К. К., Глушанков Е. И. Применение итеративного детектора Soft V-BLAST для реализации пространственного разнесения в адаптивных системах MIMO-OFDM.....6

Радиолокация и навигация

Грибов Г. С. Корреляционные методы пеленгования с дополнительным сканированием по поляризационным параметрам с помощью антенной системы из триортогональных антенн.....22

Микро- и нанoeлектроника

Дудин А. Л., Зубков В. И., Богословская Л. С. Исследование влияния степени легирования квантовых ям на рабочую температуру QWIP.....35

Иванов А. А., Марголин В. И., Никифоров А. В., Нгуен Вьет Ан, Петрова Г. В., Протченко А. И., Рассадина А. А., Тупик В. А., Шарова Н. Н., Шолина И. С., Корбут А. В. Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений.....44

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

Платонов Р. А., Алтынников А. Г., Комлев А. Е., Цымбалюк А. А., Гагарин А. Г. Электрофизические параметры совместимого с 3D-печатью композита, наполненного стеклянными полыми микросферами.....57

Сапожников А. В., Крюков Р. С., Баранов А. И., Дудин А. Л., Перепеловский В. В. Исследование DX-центров в AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT.....70

Радиофотоника

Федорова Л. О., Каманина Н. В. Поляризационный нанокомпозит на основе шунгита для задач фотоники: способ упрочнения.....82

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

Козодаев Д. А., Пщелко Н. С., Посредник О. В., Булычев Д. Е. Алгоритм расчета выходного сигнала электретных емкостных преобразователей приемного типа.....99

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

Ngoua Ndong Avele J. B. Integrating Radar and Multispectral Data from Sentinel Satellites for Accurate Urban Vegetation Classification using Deep Learning Methods.....112

От редакции

Правила для авторов статей.....121

CONTENTS

Original articles

Radio Electronic Facilities for Signal Transmission, Reception and Processing

Pham Q. C., Glushankov E. I. Application of an Iterative Soft V-BLAST Detector for Spatial Diversity in Adaptive MIMO-OFDM Systems.....6

Radar and Navigation

Gribov G. S. Correlation Methods of Direction Finding with External Detectors Based on Polarization Parameters Using an Antenna System of Triorthogonal Antennas.....22

Micro- and Nanoelectronics

Dudin A. L., Zubkov V. I., Bogoslovskaya L. S. Investigation of the Effect of Quantum Well Doping on QWIP Operating Temperature.....35

Ivanov A. A., Margolin V. I., Nikiforov A. V., Nguyen Viet An, Petrova G. V., Protchenko A. I., Rassadina A. A., Tupik V. A., Sharova N. N., Sholina I. S., Korbut A. V. X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation.....44

Quantum, Solid-State, Plasma and Vacuum Electronics

Platonov R. A., Altynnikov A. G., Komlev A. E., Tsymbalyuk A. A., Gagarin A. G. Electrophysical Parameters of a 3D-Printable Composite Filled with Hollow Glass Microspheres.....57

Sapozhnikov A. V., Kryukov R. S., Baranov A. I., Dudin A. L., Perepelovskiy V. V. Study of DX centers in AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT.....70

Microwave Photonics

Fedorova L. O., Kamanina N. V. Strengthened PVA Polarizing Films Sensitized with Shungite Nanoparticles.....82

Metrology, Information and Measuring Devices and Systems

Kozodaev D. A., Pshchelko N. S., Posrednik O. V., Bulychev D. E. Algorithm for Calculating the Output Signal of Electret Capacitive Transducers of the Receiving Type.....99

Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

Ngoua Ndong Avele J. B. Integrating Radar and Multispectral Data from Sentinel Satellites for Accurate Urban Vegetation Classification using Deep Learning Methods.....112

From the Editor

Author's Guide.....121

Применение итеративного детектора Soft V-BLAST для реализации пространственного разнесения в адаптивных системах MIMO-OFDM

К. К. Фам[✉], Е. И. Глушанков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

[✉]fam.kk@sut.ru

Аннотация

Введение. Классическая реализация адаптивных систем MIMO-OFDM сталкивается с проблемой неоптимального использования вычислительных ресурсов, обусловленной необходимостью параллельной реализации различных алгоритмических архитектур пространственно-временного блочного кодирования (Space-Time Block Coding – STBC) для обеспечения надежности и пространственного мультиплексирования для повышения скорости. Актуальной задачей является алгоритмическая унификация тракта обработки сигналов.

Цель работы. Разработка и исследование унифицированной архитектуры адаптивной системы MIMO-OFDM, позволяющей исключить специализированные аппаратные кодеры STBC из передающего тракта за счет компенсации потери ортогональности применением итеративного приемника с мягким подавлением помех, обеспечивая при этом стабильную адаптацию к условиям канала.

Материалы и методы. Предложен алгоритм, реализующий принцип итеративного обмена мягкой информацией между детектором Soft V-BLAST и декодером LDPC. Эффективность алгоритма оценивалась методом имитационного моделирования путем сравнения с эталонными схемами. Для проверки работоспособности в нестационарных условиях реализован алгоритм адаптации модуляционно-кодовой схемы на основе вероятности блочной ошибки.

Результаты. Установлено, что предложенный итеративный приемник уже при двух итерациях обеспечивает энергетическую эффективность, эквивалентную классическим схемам STBC, но без использования ортогонального кодирования на передаче. Показано, что интеграция данного детектора в контур адаптации позволяет динамически поддерживать заданный уровень ошибок, эффективно конвертируя выигрыш от разнесения в пропускную способность канала.

Заключение. Предложенная унифицированная архитектура позволяет программно варьировать стратегию передачи от максимальной надежности до максимальной спектральной эффективности на базе единого алгоритмического ядра, минимизируя избыточность вычислительных и логических ресурсов при реализации трансивера.

Ключевые слова: системы MIMO-OFDM, итеративный приемник, Soft V-BLAST, пространственное разнесение, коды LDPC, адаптация линии связи

Для цитирования: Фам К. К., Глушанков Е. И. Применение итеративного детектора Soft V-BLAST для реализации пространственного разнесения в адаптивных системах MIMO-OFDM // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 6–21.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-6-21

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; принята к публикации после рецензирования 25.03.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

Application of an Iterative Soft V-BLAST Detector for Spatial Diversity in Adaptive MIMO-OFDM Systems

Quyen C. Pham✉, Evgeniy I. Glushankov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St Petersburg, Russia

✉ fam.kk@sut.ru

Abstract

Introduction. Conventional implementations of adaptive MIMO-OFDM make suboptimal use of computational resources, as they require parallel execution of distinct algorithmic architectures: Space-Time Block Coding (STBC) for transmission reliability and spatial multiplexing for increased throughput. Consequently, the algorithmic development of a unified signal-processing architecture remains an open problem.

Aim. This study develops and evaluates a unified adaptive MIMO-OFDM architecture that eliminates dedicated hardware STBC encoders from the transmit chain. This is achieved by compensating for the loss of orthogonality through an iterative receiver with soft interference cancellation while maintaining stable channel adaptation.

Materials and methods. The proposed algorithm performs iterative soft-information exchange between a Soft V-BLAST detector and a Low-Density Parity-Check (LDPC) decoder. Its performance was evaluated through computer simulation against established reference schemes. To assess operability under non-stationary conditions, a link-adaptation algorithm for the Modulation and Coding Scheme (MCS) was implemented using the block-error-rate criterion.

Results. The proposed iterative receiver achieves BER performance comparable to that of conventional STBC schemes within two iterations, without employing orthogonal transmit coding. Integrating the detector into the adaptation loop enables dynamic maintenance of a target error rate, effectively trading the diversity gain for increased channel throughput.

Conclusion. The proposed unified architecture enables software-defined adjustment of the transmission strategy from maximum reliability to maximum spectral efficiency within a single algorithmic core, thereby minimizing computational and logic-resource overhead in transceiver implementation.

Keywords: MIMO-OFDM systems, Iterative receiver, Soft V-BLAST, Spatial diversity, LDPC codes, Link adaptation

For citation: Pham Q. C., Glushankov E. I. Application of an Iterative Soft V-BLAST Detector for Spatial Diversity in Adaptive MIMO-OFDM Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 6–21.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-6-21

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

Submitted 17.07.2025; accepted 25.03.2026; published online 29.06.2026

Введение. Современный этап развития беспроводных сетей (5G/6G) характеризуется экспоненциальным ростом требований к спектральной эффективности и надежности передачи данных. Фундаментальной технологической платформой для удовлетворения этих требований являются системы с множественными входами и выходами (Multiple Input Multiple Output – MIMO) на основе ортогонального частотного разделения каналов (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [1].

В классической теории MIMO существует дихотомия между двумя базовыми стратегиями: пространственным мультиплексированием (Spatial Multiplexing – SM) для максимизации пропускной способности и пространственно-временным блочным кодированием (Space-Time Block Coding – STBC) для обеспечения эффекта пространственного разнесения и повышения помехоустойчивости системы. Для оптимизации спектральной и энергетической эффективности в условиях нестационарных

каналов применяются алгоритмы адаптивного переключения. В существующих исследованиях стратегии переключения между режимами STBC и SM базируются на различных метриках, варьирующихся от классического отношения сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR) до более комплексных параметров, таких как число обусловленности канальной матрицы, уровень пространственной корреляции или статистика пакетных ошибок [2–4]. Однако существенным недостатком традиционных адаптивных архитектур является необходимость параллельной аппаратной реализации специализированных вычислительных блоков для перехода от режима разнесения к мультиплексированию. Это приводит к неэффективному использованию логических ресурсов (например, вентиляционной емкости при реализации на ПЛИС/FPGA) и существенному усложнению архитектуры приемопередатчика.

Актуальной научно-технической задачей является разработка унифицированной архитектуры, позволяющей гибко совмещать преимущества обоих подходов на базе единого вычислительного ядра. Ключевая идея предлагаемого метода заключается в отказе от использования специализированных кодеров STBC, традиционно обеспечивающих ортогональность передаваемых сигналов. Для компенсации потери пространственно-временной ортогональности на приемной стороне задействуется высокоэффективный итеративный детектор Soft V-BLAST.

Цель исследования – разработка и комплексный анализ эффективности унифицированной архитектуры системы MIMO-OFDM с итеративным приемником Soft V-BLAST, а также исследование ее применения в контуре адаптивной передачи данных.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка математической модели и алгоритмическая реализация оценки канала на основе линейного минимума среднеквадратической ошибки (Linear Minimum Mean Square Error – LMMSE).

2. Синтез структуры итеративного приемника, поддерживающего режимы пространственного разнесения, мультиплексирования и гибридной передачи на базе единого ядра.

3. Сравнительный анализ помехоустойчивости предложенной схемы с классическими эталонами (Аламоути, ортогональных (Orthogonal STBC – OSTBC) и квазиортогональных (Quasi-Orthogonal STBC – QOSTBC) кодов).

4. Разработка и исследование алгоритма адаптации линии связи на основе метрики вероятности блочной ошибки (Block Error Rate – BLER) с механизмом стабилизации.

Математическая модель передачи. Рассмотрим передающий тракт адаптивной системы MIMO-OFDM с конфигурацией $N_t \times N_r$, где N_t и N_r – количество передающих и приемных антенн соответственно. Обобщенная функциональная схема системы представлена на рис. 1. Исходный битовый поток поступает в блок распределения, логика работы которого динамически определяется текущим режимом передачи:

1. Режим пространственного разнесения: входной поток дублируется на входы всех N_t параллельных ветвей. С целью оптимизации аппаратных ресурсов в режиме разнесения применяется единый кодер LDPC, расположенный до блока пространственного распределения. Использование независимых псевдослучайных перемежителей в каждой передающей ветви приводит к формированию распределенного пространственно-частотно-временного блочного кода (Space-Frequency-Time Block Code – SFTBC). Структура кодовой матрицы синтезированного SFTBC детерминирована исключительно параметрами таблиц перемежения, обеспечивая эффективное рассеяние символов в пространственной, временной и частотной (по поднесущим OFDM) областях.

2. Режим пространственного мультиплексирования: входной поток демультиплексируется на N_t независимых подпотоков.

3. Гибридный режим: передающие антенны объединяются в группы. Внутри каждой группы соответствующий подпоток дублируется на антенны этой группы.

После этапа распределения в каждой ветви применяется независимый псевдослучайный перемежитель с различными параметрами инициализации, а сигнал формируется на базе технологии OFDM [5]. Комплексный отсчет сигнала во временной области $x_t^{(n)}$ для t -й пере-

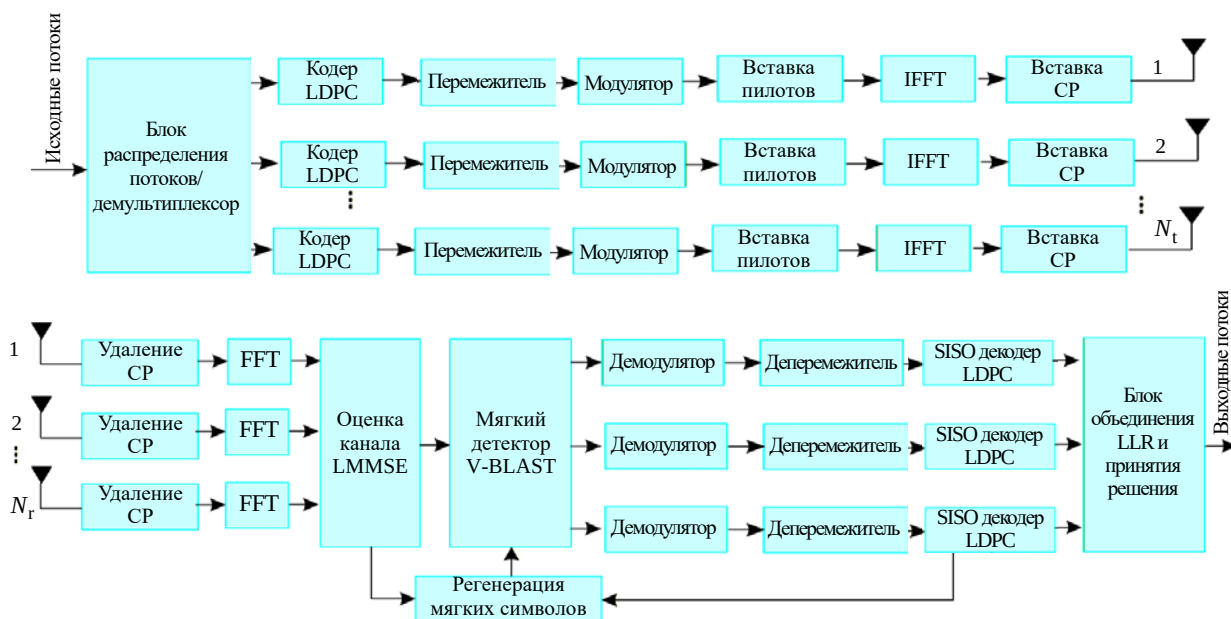


Рис. 1. Функциональная схема приемо-передатчика с унифицированной архитектурой и итеративной обработкой сигналов

Fig. 1. Functional block diagram of the transceiver with a unified architecture and iterative signal processing

дающей антенны на n -м тактовом интервале определяется обратным быстрым преобразованием Фурье (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT):

$$x_t^{(n)} = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{FFT}}}} \sum_{k=0}^{N_{\text{FFT}}-1} X_t^{(k)} \exp\left(j2\pi \frac{nk}{N_{\text{FFT}}}\right),$$

где N_{FFT} – размерность FFT; $X_t^{(k)}$ – комплексный символ, назначенный t -й антенне на k -й поднесущей в соответствии с описанной ранее логикой распределения.

Для минимизации межсимвольной интерференции, возникающей в многолучевых каналах, и сохранения ортогональности поднесущих к каждому OFDM-символу добавляется циклический префикс (Cyclic Prefix – CP) длиной N_{CP} , превышающей максимальную задержку многолучевого распространения.

Математическая модель приема. На приемной стороне после удаления CP и выполнения операции FFT сигнал преобразуется в частотную область. Модель принятого сигнала $\mathbf{Y}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ для k -й поднесущей описывается уравнением

$$\mathbf{Y}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)} \mathbf{X}^{(k)} + \mathbf{n}^{(k)},$$

где $\mathbf{H}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ – матрица коэффициентов канала для k -й поднесущей, где ее элемент $h_{rt}^{(k)}$

характеризует комплексный коэффициент передачи между t -й передающей и r -й приемной антеннами; $\mathbf{X}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ – вектор передаваемых символов, сформированный согласно описанному алгоритму распределения; $\mathbf{n}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ – вектор аддитивного белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей.

Для анализа эффективности системы в различных условиях распространения рассматриваются две статистические модели огибающей канальных коэффициентов $z = |h_{rt}^{(k)}|$ [6]:

1. Рэлеевские замирания, характеризующие условия отсутствия прямой видимости между передатчиком и приемником. Плотность вероятности описывается выражением

$$p(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-z^2/(2\sigma^2)},$$

где $2\sigma^2$ – средняя мощность рассеянной компоненты.

2. Райсовские замирания, описывающие сценарий с наличием доминирующей компоненты прямой видимости с амплитудой A . Плотность вероятности подчиняется распределению Райса:

$$p(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{zA}{\sigma^2}\right),$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Степень преобразования прямой видимости определяется K -фактором, рассчитываемым как $K = A^2 / (2\sigma^2)$.

Оценка канала на основе пилот-сигналов [7]. Для реализации когерентного приема и эффективного подавления интерференции применяется двухэтапная процедура оценки канала, аппроксимирующая оптимальный байесовский оценщик при сниженной вычислительной сложности.

Первичная оценка. На основе ортогональных пилотных последовательностей формируется начальная оценка матрицы канала методом наименьших квадратов (Least Squares – LS). В матричной форме оценка канальной матрицы $H_{LS}^{(k)}$ для k -й поднесущей определяется выражением

$$\hat{H}_{LS}^{(k)} = Y_{\text{pilot}}^{(k)} (P^{(k)})^{-1},$$

где $Y_{\text{pilot}}^{(k)}$ – матрица принятых пилотных сигналов; $P^{(k)}$ – матрица известных ортогональных пилотных символов. Метод LS является несмещенным, однако он не учитывает статистические свойства шума, что приводит к значительному росту ошибки оценивания в условиях низкого SNR.

LMMSE-фильтрация и частотное сглаживание. Принимая допущение о пространственной некоррелированности антенн и нормировке средней мощности канала, весовую матрицу можно упростить до скалярного коэффициента:

$$\hat{H}_{LMMSE}^{(k)} = \frac{1}{1 + \sigma_n^2} \hat{H}_{LS}^{(k)},$$

где σ_n^2 – дисперсия аддитивного шума. Данный весовой коэффициент эффективно подавляет шумовые выбросы в областях с низким SNR.

Для использования корреляционных свойств канала в частотной области применяется сглаживание оценки вдоль поднесущих. Результирующая матрица канала $\hat{H}_{\text{res}}^{(k)}$, передаваемая в детектор, вычисляется сверткой с окном:

$$\hat{H}_{\text{res}}^{(k)} = \sum_{m=-M}^M c_m \hat{H}_{LMMSE}^{(k-m)},$$

где c_m – весовые коэффициенты окна сглаживания шириной $2M + 1$. Данная процедура позволяет дополнительно снизить дисперсию ошибки оценки.

Алгоритм детектирования V-BLAST с мягким выходом (Soft V-BLAST) [8, 9]. Входными данными для детектора являются вектор принятого сигнала $Y^{(k)}$ и матрица оценки канала $\hat{H}_{\text{res}}^{(k)}$. Поскольку обработка выполняется независимо для каждой поднесущей, для компактности записи опустим индекс поднесущей k . Введем следующие обозначения: Y – вектор принятого сигнала (соответствует $Y^{(k)}$); $\hat{H}$ – матрица оценки канала (соответствует $\hat{H}_{\text{res}}^{(k)}$).

Алгоритм реализует процедуру последовательного подавления интерференции с мягкими решениями. Процесс детектирования выполняется итеративно по слоям. Пусть $q = 1, \dots, N_t$ – номер текущей итерации. Инициализируем вектор сигнала $Y_1 = Y$ и матрицу канала $\hat{H}_1 = \hat{H}$. На каждом шаге q выполняются следующие операции:

1. Вычисление фильтра MMSE и упорядочивание. Для подавления интерференции рассчитывается весовая матрица G_q на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки:

$$G_q = (\hat{H}_q^H \hat{H}_q + \sigma_n^2 I)^{-1} \hat{H}_q^H.$$

Оптимальный порядок детектирования p_q выбирается из множества еще не детектированных потоков S_q по критерию максимизации постпроцессингового SNR, что соответствует выбору строки матрицы с минимальной евклидовой нормой:

$$p_q = \arg \min_{t \in S_q} \|(G_q)_t\|^2,$$

где $(G_q)_t$ – t -я строка матрицы G_q .

2. Обнаружение символа и вычисление логарифмических отношений правдоподобия (Log-Likelihood Ratio – LLR). Формируется ве-

совой вектор $\mathbf{v}_{p_q}$, соответствующий строке матрицы G_q для выбранного слоя. Линейная оценка символа $\tilde{x}_{p_q}$ вычисляется как

$$\tilde{x}_{p_q} = (\mathbf{v}_{p_q})^T \mathbf{Y}_q.$$

Данная оценка преобразуется в LLR для битов символа. Для модуляции квадратурной фазовой манипуляции (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK), аппроксимируя распределение интерференции как гауссовское, получим:

$$\begin{aligned} \text{LLR}(b_{\text{Re}}) &\approx \frac{2\sqrt{2}}{\sigma_{\text{ef}}^2} \text{Re}(\tilde{x}_{p_q}); \\ \text{LLR}(b_{\text{Im}}) &\approx \frac{2\sqrt{2}}{\sigma_{\text{ef}}^2} \text{Im}(\tilde{x}_{p_q}), \end{aligned}$$

где b_{Re} и b_{Im} – биты, соответствующие синфазной (Real – Re) и квадратурной (Imaginary – Im) составляющим QPSK-символа; σ_{ef}^2 – дисперсия эффективного шума. Полученные значения передаются на вход декодера LDPC.

3. Вычитание помехи. Для формирования сигнала для следующей итерации вычисляется математическое ожидание символа $\bar{x}_{p_q}$. Для модуляции QPSK, ввиду ортогональности и статистической независимости синфазной (Re) и квадратурной (Im) составляющих, оценка $\bar{x}_{p_q}$ вычисляется аналитически через нелинейную функцию гиперболического тангенса [10]:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{p_q} = \\ = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\text{th} \left(\frac{\sqrt{2} \text{Re}(\tilde{x}_{p_q})}{\sigma_{\text{ef}}^2} \right) + j \text{th} \left(\frac{\sqrt{2} \text{Im}(\tilde{x}_{p_q})}{\sigma_{\text{ef}}^2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Для сигнально-кодовых конструкций высших порядков (в частности, QAM-16) с целью минимизации вычислительной сложности реализуется независимая покомпонентная обработка. Квадратурные составляющие рассматриваются как независимые сигналы с амплитудно-импульсной модуляцией (для квадратурной амплитудной модуляции (Quadrature Amplitude Modulation – QAM-16) применяется 4-уровневая амплитудно-импульсная модуляция: $\mathcal{A} = \{-3\alpha, -\alpha, \alpha, 3\alpha\}$),

где нормирующий множитель $\alpha = 1/\sqrt{10}$ обеспечивает единичную среднюю мощность созвездия. В предложенной реализации апостериорные вероятности $P(a|y)$ для каждого уровня $a \in \mathcal{A}$ при наблюдении $y \in \{\text{Re}(\tilde{x}_{p_q}), \text{Im}(\tilde{x}_{p_q})\}$ оцениваются напрямую на основе гауссовской аппроксимации остаточной интерференции:

$$P(a|y) = \frac{\exp\left(-\frac{(y-a)^2}{\sigma_{\text{ef}}^2}\right)}{\sum_{a' \in \mathcal{A}} \exp\left(-\frac{(y-a')^2}{\sigma_{\text{ef}}^2}\right)}.$$

На базе полученного распределения вычисляется условное математическое ожидание $\mathbb{E}[x|y]$ для соответствующих квадратурных осей. Данная величина представляет собой статистически усредненную оценку переданного уровня, взвешенную по критерию максимума апостериорной вероятности:

$$\mathbb{E}[x|y] = \sum_{a \in \mathcal{A}} a P(a|y).$$

Результирующий комплексный мягкий символ $\bar{x}_{p_q}$ синтезируется путем квадратурного сложения покомпонентных оценок:

$$\bar{x}_{p_q} = \mathbb{E}[x_{\text{Re}} | \text{Re}(\tilde{x}_{p_q})] + j \mathbb{E}[x_{\text{Im}} | \text{Im}(\tilde{x}_{p_q})].$$

Вклад текущего потока вычитается из принятого сигнала:

$$\mathbf{Y}_{q+1} = \mathbf{Y}_q - \hat{\mathbf{h}}_{p_q} \bar{x}_{p_q},$$

где $\hat{\mathbf{h}}_{p_q}$ – столбец исходной матрицы канала $\hat{\mathbf{H}}$, соответствующий индексу p_q .

4. Для подготовки к следующему шагу в матрице $\hat{\mathbf{H}}_q$ данный столбец обнуляется, формируя $\hat{\mathbf{H}}_{q+1}$.

Алгоритмы постобработки и декодирования. Сформированная в детекторе последовательность мягких метрик подвергается процедуре дегерметирования, обратной операциям на передающей стороне. Это обеспечивает декорреляцию пакетов ошибок, возникающих в канале с

замираниями, приближая канал к модели без памяти, что является необходимым условием эффективности итеративного декодирования.

Декодирование кода LDPC осуществляется алгоритмом нормализованной суммы-минимума, представляющим собой вычислительно эффективную аппроксимацию алгоритма распространения доверия, в режиме мягкого входа и мягкого выхода (Soft-Input Soft-Output – SISO) [11]. В отличие от классических схем с жестким выходом, декодер формирует вектор апостериорных LLR для каждого u -го кодового бита:

$$I_{\text{post}}^{(u)} = \ln \frac{P(b_u = 0 | \mathbf{Y}, \hat{H})}{P(b_u = 1 | \mathbf{Y}, \hat{H})}.$$

Архитектура итеративного приемника и синтез решающей статистики. Реализация потенциала предлагаемой системы MIMO-OFDM базируется на итеративном обмене мягкой информацией между блоками детектирования и декодирования, что позволяет последовательно минимизировать уровень взаимной корреляции потоков и компенсировать интерференцию. Ключевым элементом предложенной схемы является блок "Регенерация мягких символов" (см. рис. 1), который замыкает итеративную петлю обработки. В отличие от жестких решений итеративная петля оперирует оценками математического ожидания символов. Вектор апостериорных LLR на выходе декодера преобразуется в оценки мягких битов посредством нелинейной функции [12]:

$$\hat{b}_{\text{soft}}^{(u)} = \text{th} \left(\frac{I_{\text{post}}^{(u)}}{2} \right).$$

Далее выполняется процедура, обратная приемной: мягкие биты подвергаются перемежению и модуляции, формируя вектор оценок переданных символов $\bar{\mathbf{x}}_{fb}$ для всех пространственных слоев. Синтез данных оценок определяется типом применяемой модуляции (аналитический расчет для QPSK или усреднение по созвездиям для QAM-16) аналогично шагу 3 алгоритма детектирования. На основе матрицы оценки канала $\hat{H}$ формируется вектор реконструированной интерференции $\mathbf{I}_{\text{est}} = \hat{H} \bar{\mathbf{x}}_{fb}$.

Важной архитектурной особенностью разработанного приемника является динамическая адаптация стратегии подавления помех в зависимости от этапа итеративного процесса. На стадии инициализации, когда априорная информация от декодера еще отсутствует, детектор функционирует по алгоритму Soft V-BLAST, реализующему процедуру последовательного исключения помех и сортировку слоев. Однако на последующих этапах итеративного уточнения оценок, по мере накопления достоверности мягких решений, система осуществляет переход к стратегии параллельного подавления интерференции (Parallel Interference Cancellation – PIC) [13]. Данная трансформация архитектуры обусловлена стремлением к оптимизации вычислительной эффективности: переход к PIC позволяет снизить асимптотическую сложность детектора с кубической до квадратичной, устраняя необходимость повторного вычисления псевдообратных матриц и переупорядочивания слоев. Потенциальное снижение помехоустойчивости, свойственное методу PIC из-за отказа от сортировки, в предлагаемой схеме эффективно компенсируется использованием высоконадежных регенерированных символов, поступающих из цепи обратной связи.

Математически процедура параллельного подавления для t -го целевого потока реализуется путем одновременного вычитания оценок интерференции от всех конкурирующих антенн из принятого сигнала:

$$\mathbf{Y}_t^{\text{PIC}} = \mathbf{Y} - \sum_{t' \neq t} \hat{\mathbf{h}}_{t'} \bar{\mathbf{x}}_{fb, t'},$$

где t' – индекс передающей антенны, отличный от целевого индекса t ($t' \neq t$). Сформированный очищенный сигнал $\mathbf{Y}_t^{\text{PIC}}$ затем подвергается линейной MMSE-фильтрации для обновления апостериорных метрик.

Заключительным этапом обработки является принятие жестких решений о переданных битах. На вход решающего устройства поступает набор векторов апостериорных LLR ($\mathbf{L}_{\text{post}1}, \dots, \mathbf{L}_{\text{post}t}, \dots, \mathbf{L}_{\text{post}N_t}$) от декодеров всех пространственных ветвей. Архитектура решающего блока является программно-реконфигурируемой и адаптируется к текуще-

му режиму передачи:

1. Режим пространственного разнесения. Поскольку через все антенны передается единый информационный поток, но прошедший через разные каналы, применяется алгоритм взвешенного комбинирования LLR, реализующий принцип максимального сложения отношений в вероятностной области [14]. Результирующая метрика для u -го бита вычисляется как

$$\Lambda_{\Sigma}^{(u)} = \sum_{t=1}^{N_t} \omega_t L_{\text{post } t}^{(u)},$$

где ω_t – весовой коэффициент t -й ветви разнесения. В данном режиме предлагается использовать алгоритм взвешенного комбинирования LLR. Коэффициент ω_t рассчитывается на основе оценки энергии канала, усредненной по всем информационным поднесущим N_{data} :

$$\omega_t = \frac{1}{N_{\text{data}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{data}}} \|\hat{\mathbf{h}}_t^{(k)}\|^2,$$

где $\hat{\mathbf{h}}_t^{(k)}$ – вектор-столбец канальной матрицы, соответствующий пути от t -й передающей антенны. Такой подход гарантирует, что при принятии финального решения доминирующий вклад вносят те ветви, которые обладают наилучшими условиями распространения, минимизируя влияние глубоких замираний.

2. Режим пространственного мультиплексирования. В данном режиме передаются независимые информационные потоки, поэтому пространственное комбинирование метрик LLR не выполняется. Жесткое решение принимается индивидуально для каждого независимого потока, а итоговая вероятность битовой ошибки (Bit Error Rate – BER) системы оценивается путем усреднения результатов по всем потокам. Для u -го бита t -го потока жесткое решение выносится на основе знака LLR:

$$\hat{b}_{u,t} = \begin{cases} 1, & \text{если } L_{\text{post } t}^{(u)} < 0; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3. Гибридный режим. Применяется комбинированная логика: внутри групп идентичных антенн выполняется взвешенное суммирование

метрик, а между группами решения принимаются независимо.

Адаптация канала и управление режимами. Для реализации потенциала унифицированной архитектуры в нестационарных условиях разработана подсистема адаптации линии связи. Задача алгоритма заключается в динамическом выборе оптимальной схемы модуляции и кодирования (Modulation and Coding Scheme – MCS) с целью максимизации спектральной эффективности при соблюдении ограничений на надежность передачи. Набор доступных конфигураций MCS, включающий различные комбинации модуляционных созвездий и скоростей LDPC-кода, приведен в табл. 1.

Табл. 1. Параметры используемых уровней MCS

Tab. 1. Parameters of the MCS levels

Уровень MCS	Тип модуляции	Скорость кодирования LDPC	Спектральная эффективность (бит/символ)
1	BPSK	1/2	1/2
2	QPSK	1/2	1
3	QPSK	3/4	3/2
4	QAM-16	1/2	2
5	QAM-16	3/4	3

В качестве целевого критерия качества в работе принята вероятность BLER, которая реализуется посредством механизма контроля целостности на основе циклического избыточного кода: при успешном декодировании генерируется сигнал подтверждения приема (Acknowledgment – ACK), при ошибке – отрицательного подтверждения приема. Для стабилизации работы в условиях флуктуаций канала реализован алгоритм с гистерезисом на основе счетчика успешных передач C_{ACK} [15]. Логика переключения построена на принципе асимметрии реакций:

1. Быстрая адаптация вниз. При регистрации одной ошибки текущий индекс MCS мгновенно понижается, а счетчик обнуляется ($C_{\text{ACK}} = 0$). Это обеспечивает защиту соединения от разрыва при резком ухудшении качества канала.

2. Консервативная адаптация вверх. Индекс MCS повышается только при достижении счетчиком порогового значения N_s , т. е. после приема серии из N_s безошибочных блоков подряд.

Математически связь между порогом переключения N_s и целевой вероятностью ошибки $\text{BLER}_{\text{target}}$ в установившемся режиме аппроксимируется соотношением

$$\text{BLER}_{\text{target}} \approx \frac{1}{N_s + 1}.$$

В рамках данного исследования для детального анализа динамической устойчивости предлагаемого итеративного приемника целевой уровень качества установлен на отметке $\text{BLER}_{\text{target}} \approx 10^{-1}$. Соответственно, порог переключения выбран равным $N_s = 9$. Такой выбор позволяет оценить способность унифицированной архитектуры оперативно отслеживать изменения канала и конвертировать выигрыш от пространственного разнесения в пропускную способность без введения задержек на сбор статистики, характерных для сверхнадежных режимов ($\text{BLER}_{\text{target}} \leq 10^{-2}$).

Эталонные схемы STBC [16]. Для верификации эффективности предложенной унифицированной архитектуры проводится сравнительный анализ с классическими схемами STBC. Выбор эталонов обусловлен необходимостью покрытия различных точек компромисса между скоростью передачи, надежностью и сложностью обработки. В отличие от предложенного метода, реализующего разнесение через повторение символов, эталонные системы базируются на жесткой алгебраической структуре кодовой матрицы $S \in \mathbb{C}^{N_t \times T}$, где T – длительность блока. Рассматриваются следующие конфигурации:

1. Схема Аламути (2×2) – классическая схема ортогонального кодирования, являющаяся единственным решением STBC с комплексными коэффициентами, обеспечивающим полную скорость передачи ($R = 1$) при сохранении строгой ортогональности каналов. Матрица кодирования имеет вид

$$S_1 = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}.$$

2. Ортогональный код (OSTBC, 4×4). Для конфигурации с четырьмя антеннами невозможно построить ортогональный код с единичной скоростью. В качестве эталона надежности выбрана стандартная схема со скоростью $R = 3/4$. Она гарантирует полное устранение межсимвольной интерференции линейными методами, но ценой снижения спектральной эффективности на 25 %:

$$S_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & s_3 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* & s_2 \\ 0 & s_3^* & -s_2^* & -s_1 \end{bmatrix}.$$

3. Квазиортогональный код (QOSTBC, 4×4). В качестве эталона скорости используется схема QOSTBC, восстанавливающая полную скорость передачи ($R = 1$). Однако это достигается за счет ослабления условия ортогональности, что приводит к появлению взаимной интерференции между парами символов:

$$S_3 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_3 & s_4 & s_1 & s_2 \\ -s_4^* & -s_3 & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix}.$$

Для обеспечения корректности сопоставления с предлагаемым итеративным приемником детектирование всех эталонных схем STBC осуществляется с помощью стандартного линейного эквалайзера MMSE.

Результаты моделирования. Для верификации предложенных алгоритмов и оценки эффективности системы была разработана имитационная модель в среде MATLAB. Ключевые параметры моделирования приведены в табл. 2.

На начальном этапе имитационного моделирования, проводимого в режиме пространственного разнесения при фиксированной модуляции QPSK и скорости кодирования LDPC $R_{\text{LDPC}} = 1/2$, была выполнена верификация предложенного алгоритма взвешенного комбинирования LLR. Результаты сравнительного анализа с методом равновесового суммирования (рис. 2) подтверждают, что введение адаптивных весовых

Табл. 2. Основные параметры имитационной модели

Tab. 2. Key simulation parameters

Категория	Параметр	Значение
Параметры MIMO и модель канала	Конфигурация антенн	$2 \times 2, 4 \times 4$
	Модель канала	Рэля и Райса (K -фактор = 5)
	Профиль задержек мощности	[0; –3; –9] дБ
	Временные задержки лучей	[0; 1; 2,5] мкс
	Модель временной изменчивости	Квазистатическая (характеристики канала постоянны на длине одного кодового блока LDPC)
	Максимальный доплеровский сдвиг	0 Гц
Параметры OFDM	Полоса пропускания	1 МГц
	Размерность FFT	64
	Разнос поднесущих (Δf)	15.625 кГц
	N_{CP}	16 отсчетов (16 мкс)
	N_{data}	52
	Структура пилот-сигналов	Блочные пилот-сигналы с временным разделением (длина последовательности равна N_t)
	Параметры оценки канала	Окно частотного сглаживания: 5 поднесущих ($M = 2$)
Кодирование и модуляция	Типы модуляции	BPSK, QPSK, QAM-16
	Тип кодирования	LDPC (стандарт DVB-S2)
	Длина кодового блока, размер блока перемежителя	64 800 бит
	Алгоритм декодирования	BP (20 итераций)
	Скорости кодирования (R_{LDPC})	1/2, 3/4

коэффициентов ω_t обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с простым суммированием как в канале Райса, так и в канале Рэля.

Следующим шагом стала оценка динамических характеристик разработанного итеративного приемника с целью определения оптимального числа итераций (N_{iter}). На рис. 3 представлены зависимости BER от SNR, определяемого как отношение средней энергии одиночного модуляционного символа к спектральной плотности мощности шума, для конфигураций MIMO 2×2 и 4×4 в каналах Райса и Рэля. Исследование проводилось при фиксированной модуляции QPSK и скорости кодирования LDPC $R_{LDPC} = 1/2$ в режиме пространственного разнесения, с варьированием числа $N_{iter} = 1, 2, 4$.

На основании результатов анализа сходимости (рис. 3) для предлагаемого итеративного приемника зафиксировано число итераций $N_{iter} = 2$, что обеспечивает баланс между производительностью и сложностью. Результаты моделирования для антенных конфигураций 2×2 и 4×4 представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Для однозначной интерпретации графических зависимостей принята следующая номенклатура режимов работы исследуемой системы: режим 1 – пространственное разнесение; режим 2 – пространственное мультиплексирование; режим 3 – гибридный режим (только для 4×4). Антенны группируются по парам: две антенны передают первый поток данных, две другие – второй поток. В качестве

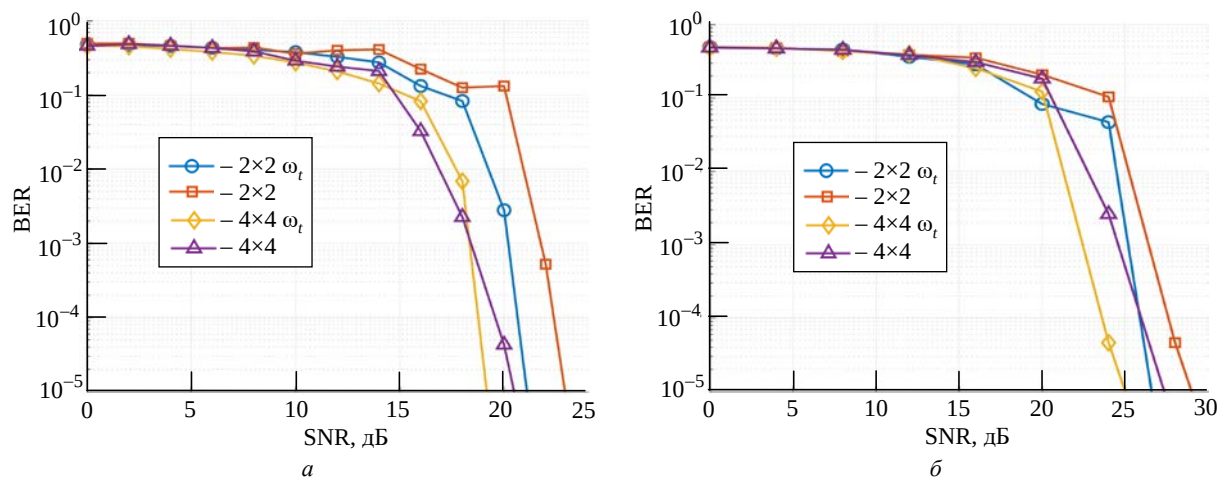


Рис. 2. Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритма взвешенного и равновесного суммирования LLR в каналах: a – Райса; b – Рэлея

Fig. 2. Performance comparison of weighted and equal-weight LLR combining algorithms in: a – Rician fading channels; b – Rayleigh fading channels

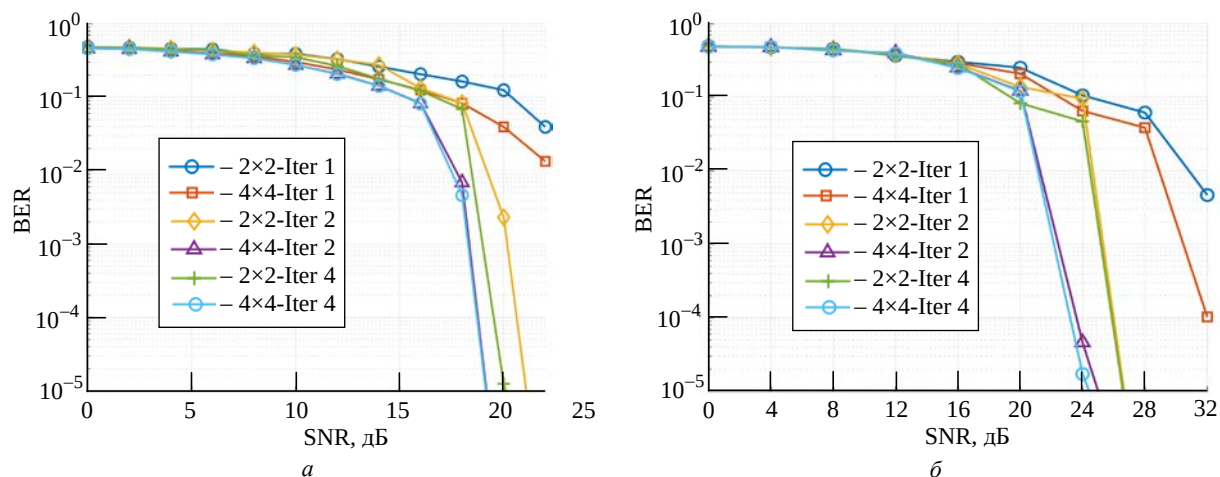


Рис. 3. Зависимость BER от SNR для разного числа итераций в каналах: a – Райса; b – Рэлея

Fig. 3. BER versus SNR for various iteration counts in: a – Rician fading channels; b – Rayleigh fading channels

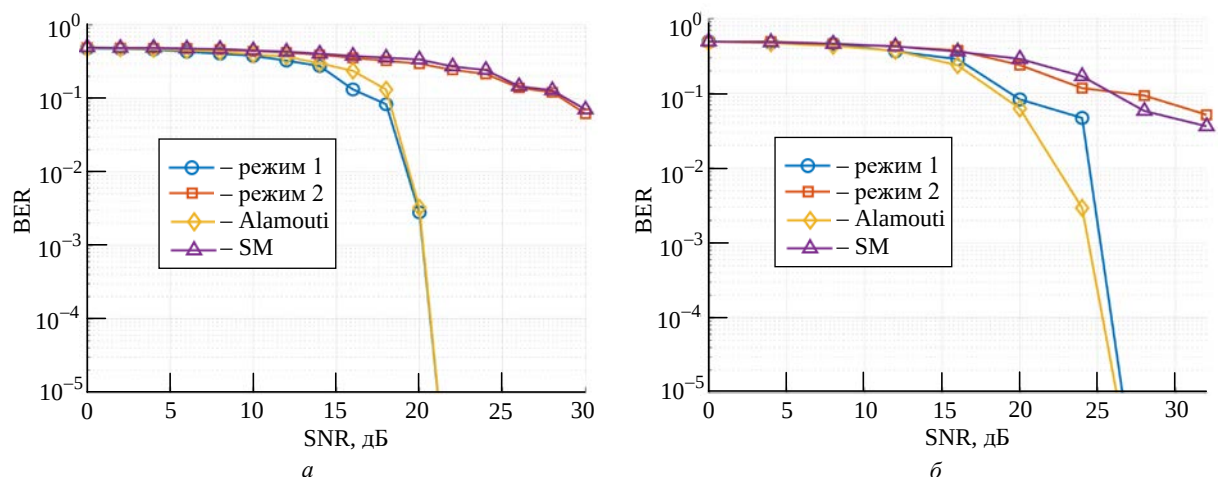


Рис. 4. Сравнительный анализ помехоустойчивости предлагаемой системы и эталонных схем для конфигурации 2×2 в каналах: a – Райса; b – Рэлея

Fig. 4. Comparative BER performance of the proposed system and reference schemes for a 2×2 antenna configuration in: a – Rician fading channels; b – Rayleigh fading channels

эталонов сравнения, на графиках приведены: схема Аламути (Alamouti), OSTBC ($R = 3/4$),

QOSTBC ($R = 1$) и SM (с использованием традиционного приемника VBLAST).

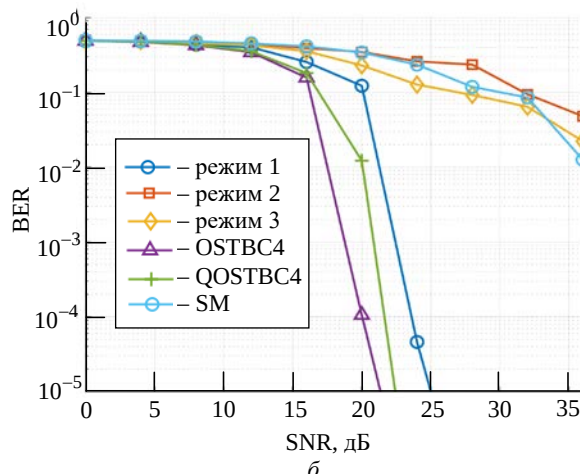
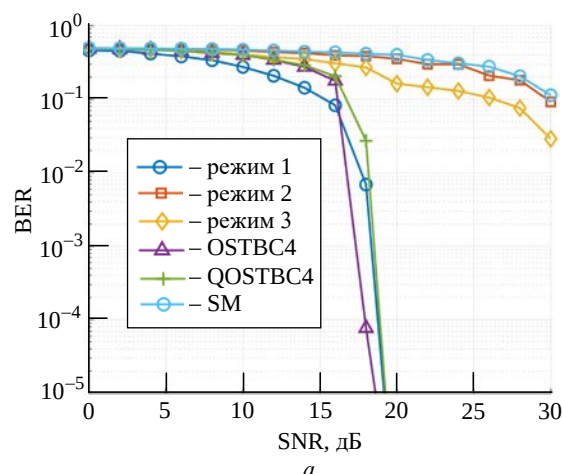
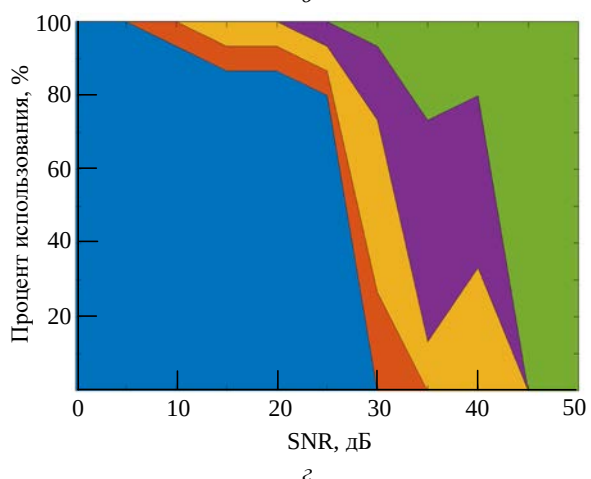
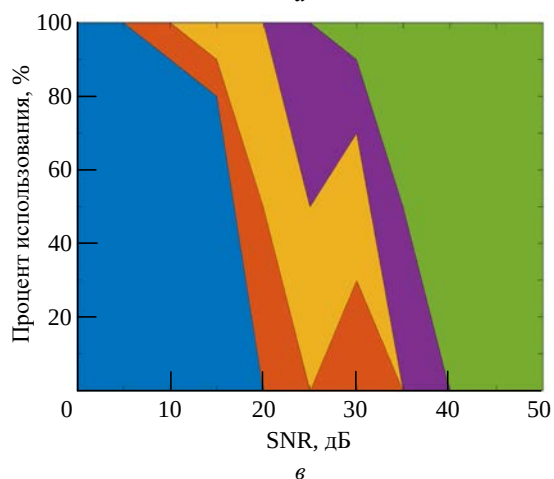
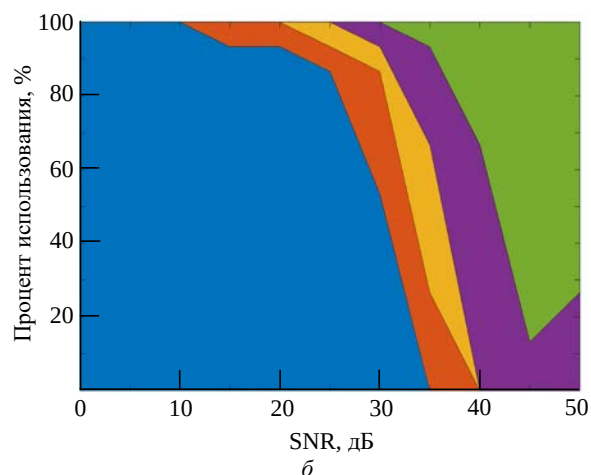
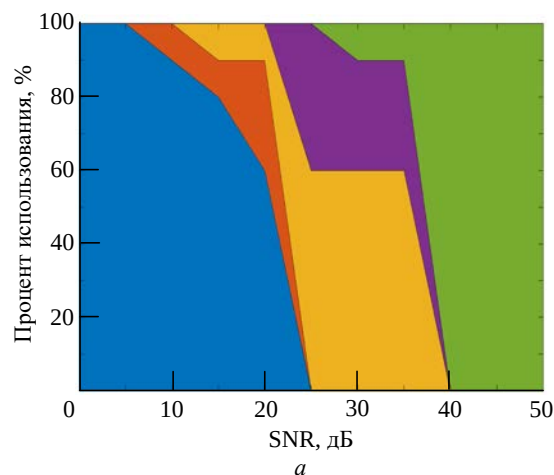


Рис. 5. Сравнительный анализ помехоустойчивости предлагаемой системы и эталонных схем для конфигурации 4×4 в каналах: а – Райса; б – Рэлея

Fig. 5. Comparative BER performance of the proposed system and reference schemes for a 4×4 antenna configuration in: а – Rician fading channels; б – Rayleigh fading channels



— MCS 1; — MCS 2; — MCS 3; — MCS 4; — MCS 5

Рис. 6. Статистическое распределение использования режимов MCS в зависимости от SNR для конфигураций 2×2 (а, б) и 4×4 (в, г) в различных условиях распространения

Fig. 6. Statistical distribution of MCS mode usage versus SNR for: (а, б) 2×2 and (в, г) 4×4 antenna configurations under various propagation conditions

На заключительном этапе исследования проведена оценка эффективности функционирования разработанного итеративного приемника ($N_{\text{iter}} = 2$) в составе замкнутой системы с адаптивной модуляцией и кодированием. Цель эксперимента – верификация способности унифицированной архитектуры поддерживать заданный уровень качества обслуживания ($\text{BLER}_{\text{target}} \approx 10^{-1}$) при максимизации скорости передачи в широком динамическом диапазоне SNR. Алгоритм адаптации оперирует пятью уровнями MCS (см. табл. 1). Результаты моделирования представлены на рис. 6 в виде диаграмм распределения вероятности использования каждого режима MCS в зависимости от SNR.

Обсуждение полученных результатов. Исходя из результатов, представленных на рис. 2, можно сделать вывод об эффективности реализованного алгоритма взвешенного комбинирования LLR. Конфигурация 4×4 обеспечивает существенный энергетический выигрыш по сравнению с системой 2×2 . Это наглядно подтверждает эффективное использование дополнительных пространственных ветвей для повышения надежности связи. Кроме того, график демонстрирует преимущество итеративной обработки: производительность алгоритма на второй итерации значительно превосходит результаты первой. Этот скачок объясняется пороговым поведением кодов LDPC. На второй итерации мягкое подавление помех эффективно устраняет межантенную интерференцию, позволяя эффективному SNR преодолеть порог сходимости декодера. Анализ результатов показывает, что дальнейшее увеличение числа итераций до 4 приносит лишь незначительный прирост эффективности. Насыщение производительности к 4-й итерации обусловлено фундаментальными ограничениями: остаточными ошибками оценки канала и тепловым шумом, которые невозможно устранить итеративной обработкой. С учетом линейного роста вычислительной сложности и задержки обработки режим с двумя итерациями ($N_{\text{iter}} = 2$) признан оптимальным компромиссом.

Сравнительный анализ рис. 4 и 5 показывает, что предложенный алгоритм достигает производительности, сопоставимой со специализи-

рованными схемами STBC, при этом обладая архитектурной гибкостью. В канале Райса (см. рис. 4, а, 5, а) предложенный метод демонстрирует более крутой спад кривой BER. Это свидетельствует о том, что предложенный алгоритм функционирует заметно стабильнее в канале Райса по сравнению с каналом Рэлея. Это различие обосновывается фундаментальными свойствами матриц канала в условиях детектирования V-BLAST. В канале Райса присутствует детерминированная компонента прямой видимости, которая стабилизирует матрицу канала, что приводит к снижению числа обусловленности матрицы, делая ее более устойчивой к инверсии. В канале Рэлея, напротив, высокая вероятность плохой обусловленности приводит к начальным ошибкам, которые труднее исправить в итеративном контуре. Главным практическим результатом исследования является подтверждение концепции унифицированной архитектуры: система обеспечивает гибкое переключение между режимами максимальной надежности и максимальной скорости исключительно за счет реконфигурации логики объединения LLR на приеме, исключая необходимость дублирования логических блоков специализированных кодеров и оптимизируя использование вычислительных ресурсов трансивера.

Представленные на рис. 6 диаграммы распределения вероятностей использования уровней MCS подтверждают корректность и эффективность работы предложенного алгоритма адаптации. Во-первых, наблюдается монотонный переход от надежных низкоскоростных режимов к высокоскоростным по мере роста SNR. Во-вторых, сравнительный анализ конфигураций показывает явное преимущество системы 4×4 . В частности, для конфигурации 4×4 области использования высоких уровней MCS (4 и 5) смещены влево по оси SNR по сравнению с системой 2×2 . Это означает, что пространственный выигрыш эффективно трансформируется в спектральную эффективность, позволяя системе раньше переключаться на более производительные схемы модуляции. Наконец, доминирование MCS 4 и MCS 5 (модуляция QAM-16) в области высоких SNR служит косвенным, но весомым доказательством качества работы предложенного приемника. Традиционные детекторы

V-BLAST часто испытывают трудности с плотными созвездиями (как QAM-16) из-за остаточной интерференции. Тот факт, что адаптивная система уверенно выбирает эти режимы, подтверждает, что итеративный приемник эффективно подавляет межантенные помехи.

Заключение. В статье представлена и исследована унифицированная архитектура адаптивной системы MIMO-OFDM, основанная на итеративном приемнике с мягким подавлением помех. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный подход позволяет отказаться от параллельной имплементации вычислительных блоков специализированных кодеров STBC в пользу унифицированной алгоритмической обработки. Доказано, что применение итеративного приемника с ограниченным числом итераций обеспечивает помехоустойчивость, эквивалентную классическим схемам STBC. Важнейшим результатом исследования является демонстрация устойчивости системы в нестационарных условиях. Интеграция итеративного детектора в контур адаптации, управляемый метрикой BLER и механизмом гистерезиса, позволила реализовать эффективную конвертацию энергетического выигрыша от простран-

ственного разнесения в повышение пропускной способности канала. Таким образом, разработанное решение представляет собой универсальный подход, позволяющий динамически варьировать стратегию передачи от максимальной надежности до максимальной скорости при использовании единого аппаратно-вычислительного ядра.

В качестве направления дальнейшего развития работы рассматривается проблема оптимизации вычислительной сложности итеративного детектора. Текущая реализация алгоритма требует выполнения операций обращения матриц, что накладывает ограничения на масштабируемость системы. В связи с этим планируется исследование методов модельно-ориентированного глубокого обучения. В частности, перспективным видится замена блоков линейного детектирования и итеративного подавления помех на архитектуры развертываемых нейронных сетей, такие как DetNet или OAMP-Net. Такой подход позволит аппроксимировать сложные алгоритмы вычисления псевдообратных матриц фиксированным набором операций в нейросетевых слоях, обеспечивая предсказуемую вычислительную сложность и детерминированную задержку обработки сигналов.

Список литературы

1. Бакулин М. Г., Крейнделин В. Б., Панкратов Д. Ю. Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 4. С. 4–12.
doi: 10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12

2. Heath R. W., Paulraj A. J. Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems // IEEE Transactions on Communications. 2005. Vol. 53, iss. 6. P. 962–968.
doi: 10.1109/TCOMM.2005.849774

3. Adaptive MIMO transmission scheme: exploiting the spatial selectivity of wireless channels / A. Forzina, A. Pandharipande, H. Kim, R. W. Heath // IEEE 61st Vehicular Technology Conf., Stockholm, Sweden, 30 May–01 June 2005. IEEE, 2005. P. 3188–3192.
doi: 10.1109/VETECS.2005.1543936

4. Глушанков Е. И., Фам К. К. Адаптивный алгоритм выбора режимов пространственного разнесения и мультиплексирования в системах MIMO-OFDM // Электросвязь. 2025. № 9. С. 91–102.
doi: 10.34832/ELSV.2025.71.9.009

5. Власов В. А. OFDM в современных технологиях связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5, № 9. С. 56–59.

6. Фам К. К., Глушанков Е. И. Исследование методов разнесенного приема в радиоканалах с зами-

раниями // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025. Т. 13, № 3. С. 1–13.
doi: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.002

7. Rana R. C., Rathod J. M. Performance analysis of different channel estimation techniques with different modulation for VBLAST MMSE MIMO-OFDM system // Intern. Conf. on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India. 23–25 March 2016. IEEE, 2016. P. 236–239.
doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566127

8. Choi W. J., Cheong K. W., Cioffi J. M. Iterative soft interference cancellation for multiple antenna systems // IEEE Wireless Communications and Networking Conf., Chicago, USA, 23–28 Sept. 2000. IEEE, 2000. Vol. 1. P. 304–309.
doi: 10.1109/WCNC.2000.904647

9. Sellathurai M., Haykin S. Turbo-BLAST for wireless communications: theory and experiments // IEEE Transactions on Signal Processing. 2002. Vol. 50, iss. 10. P. 2538–2546.
doi: 10.1109/TSP.2002.803327

10. Xiaodong W., Poor H. Iterative (turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA // IEEE Transactions on Communications. 1999. Vol. 47, № 7. P. 1046–1061.
doi: 10.1109/26.774855

11. Sy M. Demystifying 5G Polar and LDPC Codes: A Comprehensive Review and Foundations. URL: <https://arxiv.org/pdf/2502.11053v3> (дата обращения: 10.01.2026).
12. Tuchler M., Singer A. C., Koetter R. Minimum mean squared error equalization using a priori information // IEEE Transactions on Signal Processing. 2002. Vol. 50, iss. 3. P. 673–683. doi: 10.1109/78.984761
13. Matthe M., Zhang D., Fettweis G. Iterative Detection using MMSE-PIC Demapping for MIMO-OFDM Systems // European Wireless 2016; 22th Europ. Wireless Conf., Oulu, Finland, 18–20 May 2016. University of Oulu, 2016. P. 1–7.
14. Hagenauer J., Offer E., Papke L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes // IEEE Transactions on Information Theory. 1996. Vol. 42, iss. 2. P. 429–445. doi: 10.1109/18.485714
15. Self-Optimization Algorithm for Outer Loop Link Adaptation in LTE / A. Durán, M. Toril, F. Ruiz, A. Mendo // IEEE Communications Lett. 2015. Vol. 19, iss. 11. P. 2005–2008. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2477084
16. Фам К. К., Глушанков Е. И. Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в системах ММО с применением пространственно-временных кодов // Тр. учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 3. С. 59–70. doi: 10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70

Информация об авторах

Фам Конг Куен – специалист по направлению "Специальные радиотехнические системы" (2024, Военный университет радиоэлектроники), аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – энергетическая и спектральная эффективность современных беспроводных систем связи, цифровая обработка сигналов, математическое моделирование процессов обработки сигналов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, Санкт-Петербург, 193232, Россия
E-mail: fam.kk@sut.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5305-3872>

Глушанков Евгений Иванович – доктор технических наук (1991), профессор (1994), профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов: математическое моделирование случайных процессов и полей в форме стохастических дифференциальных уравнений; методы обработки сигналов; помехоустойчивое кодирование; сигнально-кодовые конструкции. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, Санкт-Петербург, 193232, Россия
E-mail: glushankov.ei@sut.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

References

1. Bakulin M. G., Kreyndelin V. B., Pankratov D. Yu. Application of MIMO Technology in Modern Wireless Communication Systems of Different Generations. T-Comm. 2021, vol. 15, no. 4, pp. 4–12. (In Russ.) doi: 10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12
2. Heath R. W., Paulraj A. J. Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems. IEEE Transactions on Communications. 2005, vol. 53, iss. 6, pp. 962–968. doi: 10.1109/TCOMM.2005.849774
3. Forenza A., Pandharipande A., Kim H., Heath R. W. Adaptive MIMO Transmission Scheme: Exploiting the Spatial Selectivity of Wireless Channels. IEEE 61st Vehicular Technology Conf., Stockholm, Sweden, 30 May–01 June 2005. IEEE, 2005, pp. 3188–3192. doi: 10.1109/VETECS.2005.1543936
4. Glushankov E. I., Pham C. Q. Adaptive Algorithm for Selecting Spatial Diversity and Multiplexing Modes in MIMO-OFDM systems. *Electrosvyaz*. 2025, no. 9, pp. 91–102. (In Russ.) doi: 10.34832/ELSV.2025.71.9.009
5. Vlasov V. A. OFDM in Modern Communication Technologies. T-Comm. 2011, vol. 5, no. 9, pp. 56–59. (In Russ.)
6. Pham C. Q., Glushankov E. I. Investigation of diversity reception methods in radio channels with fading. Modeling, Optimization and Information Technology. 2025, vol. 13, no. 3, pp. 1–13. (In Russ.) doi: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.002
7. Rana R. C., Rathod J. M. Performance Analysis of Different Channel Estimation Techniques with Different Modulation for VBLAST MMSE MIMO-OFDM System. Intern. Conf. on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India. 23–25 March 2016. IEEE, 2016, pp. 236–239. doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566127
8. Choi W. J., Cheong K. W., Cioffi J. M. Iterative Soft Interference Cancellation for Multiple Antenna Systems. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., Chicago, USA, 23–28 Sept. 2000. IEEE, 2000, vol. 1, pp. 304–309. doi: 10.1109/WCNC.2000.904647
9. Sellathurai M., Haykin S. Turbo-BLAST for Wireless Communications: Theory and Experiments. IEEE Transactions on Signal Processing. 2002, vol. 50, iss. 10, pp. 2538–2546. doi: 10.1109/TSP.2002.803327

10. Xiaodong W., Poor H. Iterative (turbo) soft interference cancellation and decoding for coded CDMA // IEEE Transactions on Communications. 1999, vol. 47, no. 7, pp. 1046–1061. doi: 10.1109/26.774855

11. Sy M. Demystifying 5G Polar and LDPC Codes: A Comprehensive Review and Foundations. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2502.11053v3> (accessed: 10.01.2026).

12. Tuchler M., Singer A. C., Koetter R. Minimum Mean Squared Error Equalization Using a Priori Information. IEEE Transactions on Signal Processing. 2002, vol. 50, iss. 3, pp. 673–683. doi: 10.1109/78.984761

13. Matthe M., Zhang D., Fettweis G. Iterative Detection using MMSE-PIC Demapping for MIMO-OFDM Systems. Europ. Wireless 2016; 22th Europ.

Wireless Conf., Oulu, Finland, 18–20 May 2016. University of Oulu, 2016, pp. 1–7.

14. Hagenauer J., Offer E., Papke L. Iterative Decoding of Binary Block And Convolutional Codes. IEEE Transactions on Information Theory. 1996, vol. 42, iss. 2, pp. 429–445. doi: 10.1109/18.485714

15. Durán A., Toril M., Ruiz F., Mendo A. Self-Optimization Algorithm for Outer Loop Link Adaptation in LTE. IEEE Communications Let. 2015, vol. 19, iss. 11, pp. 2005–2008. doi: 10.1109/LCOMM.2015.2477084

16. Pham C. Q., Glushankov E. I. Research and Development of Signal Processing Algorithms in MIMO Systems Using Space-Time Codes. Proc. of Telecom. Universities. 2025, vol. 11, no. 3, pp. 59–70. doi: 10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70

Information about the authors

Quyen Cong Pham, Specialist in Special radio engineering systems (2024, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (Cherepovets)), Postgraduate student of the Department of Radio Engineering of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: energy and spectral efficiency of modern wireless communication systems; digital signal processing; mathematical modeling of signal processing processes.

Address: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevikov Ave., Saint Petersburg 193232, Russia

E-mail: fam.kk@sut.ru

<https://orcid.org/0009-0005-5305-3872>

Evgeny I. Glushankov, Dr Sci. (Eng.) (1991), Professor (1994), Professor of the Department of Radio Engineering of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 150 scientific publications. Area of expertise: mathematical modeling of random processes and fields in the form of stochastic differential equations; methods of signal processing in radio engineering systems of information transmission.

Address: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshhevikov Ave., Saint Petersburg 193232, Russia

E-mail: glushankov.ei@sut.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

Корреляционные методы пеленгования с дополнительным сканированием по поляризационным параметрам с помощью антенной системы из триортогональных антенн

Г. С. Грибов

АО «НИИ "Вектор"», Санкт-Петербург, Россия

✉ ggribov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Повышение точности оценки местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) напрямую зависит от точности определения его угловых координат. В связи с этим остается актуальной задача повышения эксплуатационной точности пеленгования с учетом сложной сигнально-помеховой обстановки и особенностей распространения волн в коротковолновом (КВ) диапазоне. Современные радиопеленгационные системы, как правило, используют антенны, чувствительные лишь к одной компоненте электрического поля, и не учитывают изменения поляризации сигнала при его отражении в ионосфере. Это приводит к ошибкам пеленгования порядка 1° , что недостаточно для точной локализации ИРИ.

Цель работы. Моделирование методов корреляционного интерферометра и MUSIC с учетом поляризационной структуры принимаемой волны на основе антенной системы, состоящей из триортогональных антенн, и сравнение их точностных характеристик с традиционными методами пеленгования.

Материалы и методы. Математическое моделирование методов поляризационного корреляционного интерферометра и поляризационного MUSIC в среде программирования MATLAB.

Результаты. Разработана математическая модель радиопеленгатора, включающая антенную систему из триортогональных антенн и предложенные методы обработки сигналов. Выполнено сравнение точности оценки угловых координат ИРИ в зависимости от отношения сигнал/шум (ОСШ) и соотношения амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент электрического поля. Показано, что использование триортогональной антенной системы совместно с предложенными методами позволяет повысить точность пеленгования в несколько раз по сравнению с традиционными подходами. Также получены зависимости точности оценки поляризационных параметров (угла наклона и эллиптичности поляризационного эллипса) от ОСШ.

Заключение. Включение в методы корреляционного интерферометра и MUSIC дополнительного сканирования по углу наклона и эллиптичности поляризационного эллипса обеспечивает более точную оценку угловых координат ИРИ с учетом эллиптической поляризации волн в КВ-диапазоне. Предложенный подход позволяет не только улучшить пространственную разрешающую способность, но и оценивать поляризационные параметры сигнала, что может быть использовано для восстановления траектории распространения радиоволн.

Ключевые слова: поляризационный корреляционный интерферометр, поляризационный MUSIC, пеленгование, антенная решетка, поляризация, триортогональная антенна

Для цитирования: Грибов Г. С. Корреляционные методы пеленгования с дополнительным сканированием по поляризационным параметрам с помощью антенной системы из триортогональных антенн // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 22–34.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-22-34

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; принята к публикации после рецензирования 27.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

Correlation Methods of Direction Finding with External Detectors Based on Polarization Parameters Using an Antenna System of Triorthogonal Antennas

Griogry S. Gribov

JSC «Research Institute "Vector"», St Petersburg, Russia

✉ ggribov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Improving the accuracy of estimating the location of a radio source directly depends on the accuracy of its angular coordinates. Therefore, the task of improving the operational accuracy of direction finding, taking into account the complexity of the signal and noise environment and the characteristics of wave propagation in the HF band, remains relevant. Modern radio direction finding systems typically use antennas sensitive to only one component of the electric field and do not account for changes in signal polarization when reflected in the ionosphere. This leads to direction finding errors of approximately 1° , which is insufficient for precise localization of the radio source.

Aim. Modeling of the correlation interferometer and MUSIC methods taking into account the polarization structure of the received wave based on an antenna system consisting of triorthogonal antennas, and comparison of their accuracy characteristics with conventional direction-finding methods.

Materials and methods. Mathematical modeling of polarization correlation interferometer and polarization MUSIC methods in the MATLAB software environment.

Results. The mathematical model of a radio direction finder, incorporating an antenna system consisting of triorthogonal antennas and the proposed signal processing methods, was developed. The accuracy of estimating the angular coordinates of a radio source was compared depending on the signal-to-noise ratio and the amplitude ratio of the horizontal and vertical components of the electric field. It is shown that the use of a triorthogonal antenna system in combination with the proposed methods yields a several-fold increase in direction finding accuracy compared to conventional approaches. Dependencies on the signal-to-noise ratio for estimating the accuracy of polarization parameters (tilt angle and ellipticity of the polarization ellipse) were also obtained.

Conclusion. Incorporating additional scanning of the polarization ellipse's tilt angle and ellipticity into the correlation interferometer and MUSIC methods provides a more accurate estimate of the angular coordinates of the radio source, taking into account the elliptical polarization of waves in the HF band. The proposed approach not only improves spatial resolution but also enables estimation of signal polarization parameters, which can be used to reconstruct the propagation trajectory of radio waves.

Keywords: polarization correlation interferometer, polarization MUSIC, direction finding, antenna array, polarization, triorthogonal antenna

For citation: Gribov G. S. Correlation Methods of Direction Finding with External Detectors Based on Polarization Parameters Using an Antenna System of Triorthogonal Antennas. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 22–34.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-22-34

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

Submitted 27.11.2025; accepted 27.04.2026; published online 29.06.2026

Введение. В настоящее время линейная ошибка определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) составляет порядка 3 % от дальности до объекта при точности определения угловых координат радиопеленгатором, равной 1° . Однако эксплуатационная точность радиопеленгатора часто оказывается значительно ниже теоретической из-

за влияния различных дестабилизирующих факторов, что не позволяет с достаточной достоверностью локализовать цель. Одним из основных путей повышения точности определения координат ИРИ является снижение ошибки пеленгования, достигаемое за счет усовершенствования методов обработки сигналов и конструкции антенной системы.

В коротковолновом (КВ) диапазоне радиоволны распространяются преимущественно за счет многократных отражений от ионосферы и земной поверхности. При прохождении через ионосферу радиоволна под воздействием геомагнитного поля Земли расщепляется на две эллиптически поляризованные составляющие – так называемые обыкновенную и необыкновенную. В точке приема эти компоненты интерферируют, что приводит к поляризационным замираниям сигнала [1–5]. Согласно экспериментальным данным, уровень принимаемого сигнала под влиянием поляризационных эффектов может снижаться на 15...25 дБ [6].

Поляризационные ошибки пеленгования в основном обусловлены несоответствием поляризационных характеристик принимаемой радиоволны и антенной системы радиопеленгатора. Большинство современных радиопеленгаторов работают только с одной компонентой электромагнитного поля, как правило с вертикальной. Такой подход существенно снижает качество приема сигнала из-за чувствительности к интерференционным и поляризационным замираниям, особенно в условиях многолучевого распространения.

Указанные факторы напрямую влияют на эксплуатационную точность пеленгования, а следовательно, и на точность определения координат ИРИ. В связи с этим перспективным направлением повышения точности пеленгования является использование антенн, способных принимать обе ортогональные компоненты поля (например, вертикальную и горизонтальную), что позволяет учитывать полную поляризационную структуру сигнала [7–9].

В качестве такой антенны предлагается использование триортогональной антенны, способной регистрировать все три проекции поля (рис. 1).

Представленная конструкция антенны разработана с целью сохранения ортогональности

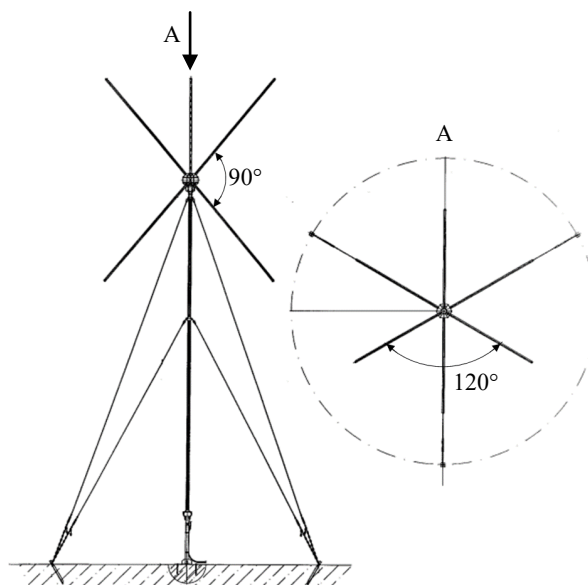


Рис. 1. Геометрическая модель триортогональной антенны

Fig. 1. Geometric model of the triorthogonal antenna element

антенных элементов в пространстве и снижения влияния подстилающей поверхности Земли на идентичность ортогональных каналов во всем КВ-диапазоне [10].

Среди основных методов пеленгования, применяемых в антенных решетках, выделяют методы корреляционного интерферометра (КИ) и MUSIC. Оба метода используют в качестве информационного параметра разности фаз между сигналами, принятыми пространственно разнесенными элементами антенной решетки. Каждый из методов обладает своими достоинствами и недостатками (таблица) [11–13]. Сканирование пространства в обоих случаях осуществляется по азимутальной и угломестной сетке.

Стоит отметить принципиальные ограничения метода корреляционного интерферометра при изменении количества близко расположенных ИРИ. В односигнальном режиме данный алгоритм обеспечивает эффективную оценку угловых координат источника. Однако при увеличении числа ИРИ пеленгационный рельеф

Табл. 1. Сравнительные характеристики корреляционных методов пеленгования

Tab. 1. Comparative characteristics of correlation methods of direction finding

Метод пеленгования	Достоинства	Недостатки
Корреляционного интерферометра	Простая реализация, высокое быстродействие	Применим при наличии в выборках сигнала одного ИРИ, при наличии нескольких ИРИ дает неверные оценки.
MUSIC	Высокая разрешающая способность (Выше, чем у метода Кейпона)	Необходимость оценки количества принятых сигналов ИРИ для выделения шумового подпространства, низкое быстродействие

еф формируется путем вычисления корреляции между суммарным вектором измерений и эталонным вектором направленности. Это приводит к интерференционному наложению откликов, слиянию локальных максимумов и возникновению систематических смещений оценок углов прихода. В отличие от корреляционного подхода метод MUSIC сохраняет работоспособность и высокую точность оценки пространственных параметров благодаря строгой ортогональности шумового подпространства к модельным векторам всех присутствующих источников. Таким образом, алгоритм MUSIC демонстрирует универсальность, обеспечивая надежное пеленгование как в односигнальном, так и в многосигнальном режимах работы.

С целью дальнейшего усовершенствования указанных методов пеленгования предлагается дополнительно выполнять сканирование по поляризационным параметрам. В качестве таких параметров могут выступать угол наклона эллипса поляризации и угол эллиптичности, которые полностью описывают состояние поляризации волны в рамках формализма Стокса или Джонса [14]. Учет поляризационной информации позволяет повысить устойчивость к замираниям и улучшить точность оценки направления прихода сигнала.

Метод поляризационного корреляционного интерферометра для антенной решетки из триортогональных антенн. Рассматриваемая антенная решетка представляет собой систему из N антенн. Каждая антенна состоит из трех взаимно ортогональных антенных элементов для регистрации трех компонент электрического поля E_x , E_y и E_z . Сигнал на выходе всей антенной решетки может быть представлен в виде вектора:

$$\mathbf{X}(t) = A(\theta, \beta, \gamma, \tau) s(t) + \mathbf{n}(t),$$

где $\mathbf{X}(t)$ – вектор сигналов на выходе антенной решетки; $A(\theta, \beta, \gamma, \tau)$ – матрица направленности и поляризации; θ – азимут; β – угол места; γ – угол эллиптичности поляризации; τ – угол наклона главной оси эллипса поляризации; $s(t)$ – комплексная огибающая полезного сигнала; $\mathbf{n}(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

Направление распространения плоской волны описывается волновым вектором:

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} [\cos \theta \cos \beta, \sin \theta \cos \beta, \sin \beta],$$

где λ – длина волны.

Каждая антенна в составе антенной решетки имеет свои пространственные координаты, задаваемые радиусом-вектором:

$$\mathbf{r}_n = [x_n, y_n, 0]^T,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

Разность фаз между сигналами, принимаемыми различными элементами антенной решетки, зависит от скалярного произведения волнового вектора $\mathbf{k}$ и радиуса-вектора $\mathbf{r}_n$. Тогда фазовый множитель для n -й антенны имеет вид

$$a_n(\theta, \beta) = \exp(-j\mathbf{k}\mathbf{r}_n). \quad (1)$$

В случае кольцевой антенной решетки радиусом r , расположенной в горизонтальной плоскости ($z = 0$), координаты n -го элемента задаются как

$$x_n = r \cos \left[\frac{2\pi(n-1)}{N} \right]; \quad (2)$$

$$y_n = r \sin \left[\frac{2\pi(n-1)}{N} \right]. \quad (3)$$

Подставив координаты (2) и (3) в выражение (1), получим фазовый множитель кольцевой антенной решетки для n -го элемента:

$$a_n(\theta, \beta) = \exp \left(-\frac{j2\pi r}{\lambda} \left\{ \cos \left[\frac{2\pi(n-1)}{N} \right] - \theta \right\} \cos \beta \right).$$

Помимо пространственных характеристик важным параметром распространяющейся волны является ее поляризация – ориентация вектора электрического поля во времени.

Для описания поляризационного состояния вводится локальный ортонормированный базис, связанный с направлением вектора $\mathbf{k}$. Данный базис состоит из двух взаимно ортогональных единичных векторов [14, 15]:

$$\mathbf{e}_h = [-\sin \theta, \cos \theta, 0]^T;$$

$$\mathbf{e}_v = [-\sin \beta \cos \theta, -\sin \beta \sin \theta, \cos \beta]^T,$$

где $\mathbf{e}_h$ – горизонтальный базисный вектор; $\mathbf{e}_v$ – вертикальный базисный вектор.

Векторы обладают следующими свойствами:

1. Нормированность: $\mathbf{e}_h = \mathbf{e}_v = 1$.
2. Ортогональность: $\mathbf{e}_h^T \mathbf{e}_v = 0$.
3. Перпендикулярность волновому вектору: $\mathbf{k} \mathbf{e}_v = 0$ и $\mathbf{k} \mathbf{e}_h = 0$.

Таким образом, базис $\{\mathbf{e}_h, \mathbf{e}_v\}$ образует плоскость поляризации, в которой и лежит вектор электрического поля.

Для описания ориентации электрического поля волны используется поляризационный вектор, который имеет следующий вид:

$$\mathbf{p}(\gamma, \tau) = \cos \gamma (\cos \tau \mathbf{e}_h + \sin \tau \mathbf{e}_v) + j \sin \gamma (-\sin \tau \mathbf{e}_h + \cos \tau \mathbf{e}_v).$$

Параметры γ и τ однозначно определяют форму и ориентацию эллипса поляризации:

- при $\gamma = 0$ – линейная поляризация;
- при $|\gamma| = \pi/4$ – круговая поляризация;
- при промежуточных значениях – эллиптическая поляризация.

Стоит отметить, что знак перед γ указывает на направление вращения эллипса: знак "–" соответствует левому вращению эллипса поляризации; знак "+" – правому.

Таким образом, для n -й триортогональной антенны сигнал на ее трех компонентах поля (E_x, E_y, E_z) равен:

$$\begin{bmatrix} E_{x,n} \\ E_{y,n} \\ E_{z,n} \end{bmatrix} = a_n(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) s(t).$$

Сигнал на выходе антенной системы, состоящей из триортогональных антенн, имеет вид

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} a_1(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \\ a_1(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \\ a_1(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \\ \vdots \\ a_N(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \\ a_N(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \\ a_N(\theta, \beta) \mathbf{p}(\gamma, \tau) \end{bmatrix} s(t) + \mathbf{n}(t).$$

Для оценки параметров $\theta, \beta, \gamma, \tau$ выполняется сравнение принятого сигнала с теоретически рассчитанным эталонным сигналом, который соответствует заданным пространственным и поляризационным параметрам волны. Для этого формируется эталонный вектор направленности:

$$\mathbf{A}_{\text{ref}} = A(\theta, \beta, \gamma, \tau).$$

Затем вычисляется корреляция между измеренным сигналом $\mathbf{X}(t)$ и эталонным сигналом $\mathbf{A}_{\text{ref}}$ за интервал наблюдения T :

$$R(\theta, \beta, \gamma, \tau) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{X}(t)^H \mathbf{A}_{\text{ref}}.$$

Оценка параметров $\theta, \beta, \gamma, \tau$ сводится к поиску максимума корреляции путем перебора по сетке значений пространственных и поляризационных параметров:

$$(\hat{\theta}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{\tau}) = \arg \max_{\theta, \beta, \gamma, \tau} R(\theta, \beta, \gamma, \tau).$$

Такой подход позволяет одновременно определить как направление прихода сигнала, так и его поляризационное состояние, что особенно важно в условиях многолучевого распространения волны и наличия помех различной поляризации.

Метод поляризационного MUSIC для антенной решетки из триортогональных антенн. В методе MUSIC работа ведется непосредственно с собственными числами и собственными векторами корреляционной матрицы принятой реализации антенной системы из триортогональных антенн. Собственные числа и собственные векторы образуют сигнальное и шумовое подпространства, поэтому данный метод принято относить к подпространственным методам пеленгования [16].

Корреляционная матрица принятого сигнала антенной решетки имеет вид [17]

$$R_{xx} = \mathbf{X}(t) \mathbf{X}^H(t). \quad (4)$$

Для нахождения собственных значений и собственных векторов матрицы (4) можно воспользоваться следующим выражением:

$$R_{xx} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H,$$

где $U = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{3N}]$ – матрица собственных векторов; $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{3N})$ – диагональная матрица собственных значений.

При известном количестве источников M можно разделить матрицу собственных значений Λ на подматрицы собственных значений сигнала и шума, а также определить сигнальную и шумовую матрицы собственных векторов. Тогда корреляционная матрица описывается выражением

$$R_{xx} = U_s \Lambda_s U_s^H + U_n \Lambda_n U_n^H,$$

где Λ_s – диагональная матрица, которая содержит M наибольших собственных значений матрицы R_{xx} ; Λ_n – диагональная матрица, содержащая оставшиеся собственные значения; $U_s = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M]$ и $U_n = [\mathbf{u}_{M+1}, \dots, \mathbf{u}_{3N}]$ – собственные векторы сигнального и шумового подпространств.

При отсутствии априорной информации о количестве сигналов в принятой реализации используется один из критериев для оценки количества сигналов [18].

Целевая функция критерия AIC выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{AIC}(p) = & -K(3N - p) \ln \left(\frac{\left[\prod_{n=p+1}^{3N} \lambda_n \right]^{\frac{1}{3N-p}}}{\frac{1}{3N-p} \sum_{n=p+1}^{3N} \lambda_n} \right) + \\ & + p(2 \cdot 3N - p), \end{aligned}$$

где K – длина выборки; p – аргумент целевой функции.

Для критерия MDL целевая функция определяется по формуле

$$\begin{aligned} \text{MDL}(p) = & K(3N - p) \ln \left(\frac{\frac{1}{3N-p} \sum_{n=p+1}^{3N} \lambda_n}{\left[\prod_{n=p+1}^{3N} \lambda_n \right]^{\frac{1}{3N-p}}} \right) + \\ & + \frac{1}{2} [p(2 \cdot 3N - p) + 1] \ln K. \end{aligned}$$

Значение аргумента целевой функции p , при котором будет достигается минимум целевой функции AIC и MDL, служит оценкой количества сигналов во входной реализации:

$$\hat{M} = \underset{p}{\text{argmin}} \{ \text{AIC}(p), \text{MDL}(p) \}.$$

Эталонный вектор $\mathbf{A}_{\text{ref}}$, который был рассмотрен ранее, соответствует заданным значениям угловых (θ, β) и поляризационных (γ, τ) параметров источника радиоизлучения. Теоретически данный вектор должен принадлежать сигнальному подпространству, ортогональному шумовому подпространству. Таким образом, в рамках метода MUSIC осуществляется перебор по множеству возможных эталонных векторов, построенных для заданных комбинаций пространственных и поляризационных параметров, с последующей проверкой их ортогональности к шумовому подпространству.

Пеленгационный рельеф поляризационного метода MUSIC выглядит следующим образом:

$$P(\theta, \beta, \gamma, \tau) = \frac{\mathbf{A}_{\text{ref}}^H \mathbf{A}_{\text{ref}}}{\mathbf{A}_{\text{ref}}^H U_n U_n^H \mathbf{A}_{\text{ref}}}.$$

Максимумы пеленгационного рельефа соответствуют оценкам направлений прихода и поляризационных характеристик источников сигнала.

Математическое моделирование методов пеленгования. Для моделирования рассмотренных в рамках данной статьи методов пеленгования была выбрана среда программирования MATLAB.

Вектор напряженности электрического поля $\mathbf{E}$ при распространении волны вдоль оси Oz в декартовой системе координат $(0, x, y, z)$ можно записать в виде

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}_h E_{0h} e^{i(\omega t - kz - \phi_h)} + \mathbf{e}_v E_{0v} e^{i(\omega t - kz - \phi_v)},$$

где E_{0h} и E_{0v} – амплитуды; ϕ_h и ϕ_v – начальные фазы при $x = 0$; $t = 0$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ –

волновое число.

Вещественные части обеих составляющих поля представляют собой линейно поляризованные волны:

$$\begin{cases} E_h = E_{0h} \cos(\omega t - kz - \phi_h), \\ E_v = E_{0v} \cos(\omega t - kz - \phi_v). \end{cases}$$

Угол наклона эллипса поляризации находится по формуле

$$\operatorname{tg}(2\tau) = \frac{2E_{0h}E_{0v}}{E_{0h}^2 - E_{0v}^2} \cos \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi = \varphi_h - \varphi_v$.

Угол эллиптичности определяется по выражению

$$\sin(2\gamma) = \frac{2E_{0h}E_{0v}}{E_{0h}^2 + E_{0v}^2} \sin \Delta\varphi.$$

Таким образом, варьирование угла наклона эллипса поляризации и угла эллиптичности в данной модели происходило за счет изменения амплитуд E_{0h} и E_{0v} .

Модель антенной решетки представляет собой девять триортогональных антенн, равномерно расположенных по кругу радиусом 25 м (рис. 2). Данная геометрия антенной системы выбрана из соображений существующей антенной решетки Rohde Schwarz ADD010, которая используется для задач радиопеленгования в КВ-диапазоне [19].

В данной модели предполагается использование 27-канального радиоприемного устройства для регистрации всех 3 компонент электрического поля с каждой триортогональной антенны.

Структурная схема модели представлена на рис. 3.

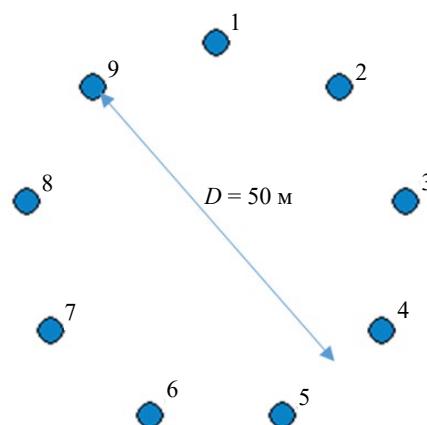


Рис. 2. Геометрия антенной системы

Fig. 2. Geometry of the antenna system

В блоке цифровой обработки сигналов происходит преобразование временной реализации в спектральную область с последующим выделением интересующей сигнальной составляющей. Также в данном блоке применяются рассмотренные методы поляризационного корреляционного интерферометра и модифицированного MUSIC с учетом поляризационных характеристик сигнала.

В блоке отображения результатов выводятся оценки азимута, угла места, а также оценки угла эллиптичности и наклона эллипса поляризации.

На основе предложенной модели были получены зависимости среднеквадратичной ошибки (СКО) оценок указанных параметров от ОСШ при различных соотношениях ампли-

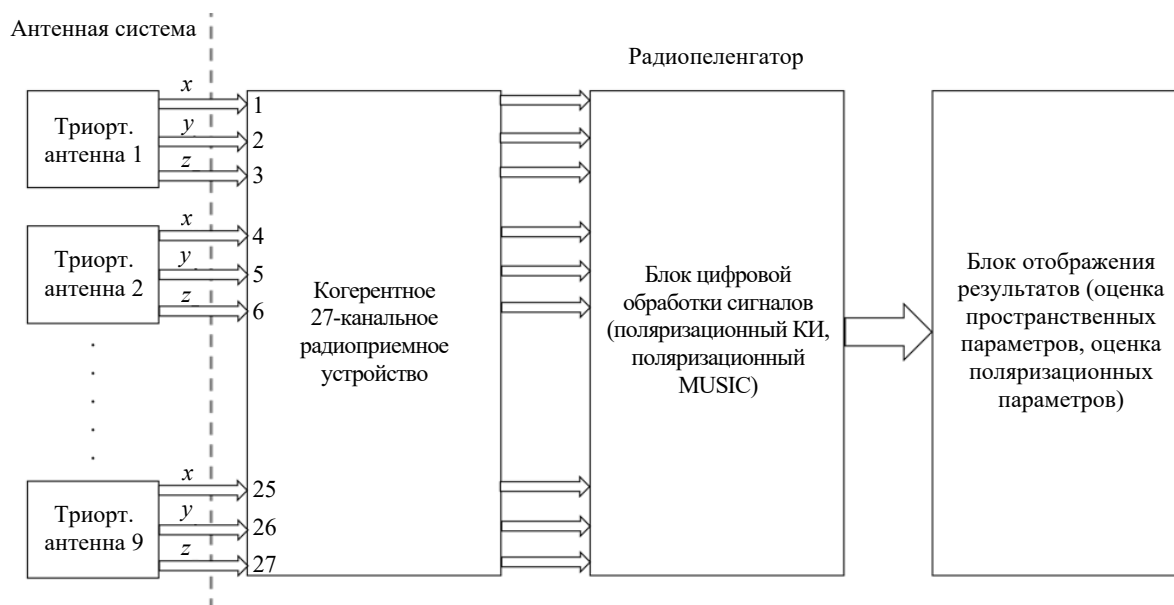


Рис. 3. Структурная схема модели радиопеленгатора

Fig. 3. Block diagram of the radio direction finder model

туд горизонтальной и вертикальной компонент электрического поля E_{0h}/E_{0v} . Результаты моделирования СКО пространственных параметров представлены на рис. 4–11.

Анализ полученных зависимостей показывает, что введение дополнительного сканирования по поляризационным параметрам позволяет существенно повысить точность оценки угловых координат ИРИ. В случае чисто вертикальной поляризации ($E_{0h}/E_{0v} = 0$) выигрыш в точности оценки азимута по сравнению с традиционными системами, использующими антенные решетки с фиксированной вертикальной поляризацией, оказывается незначительным. Это объясняется тем, что при отсутствии горизонтальной компоненты поля дополнительная информация, извлекаемая из по-

ляризационного анализа, не вносит существенного вклада в разрешение пространственных параметров. Однако при наличии эллиптической поляризации распространяющейся волны наблюдается заметное улучшение точностных характеристик. Так, при круговой поляризации ($E_{0h}/E_{0v} = 1$) СКО оценки азимута снижается в 1.6 раза по сравнению с классическим подходом. Аналогичный эффект отмечается и для угла места: точность его оценки возрастает в несколько раз.

Помимо точностных характеристик была исследована разрешающая способность предложенных алгоритмов во многосигнальном режиме. На рис. 12, 13 представлены зависимости минимального углового разнота между сигналами от ОСШ на нижней и верхней гра-

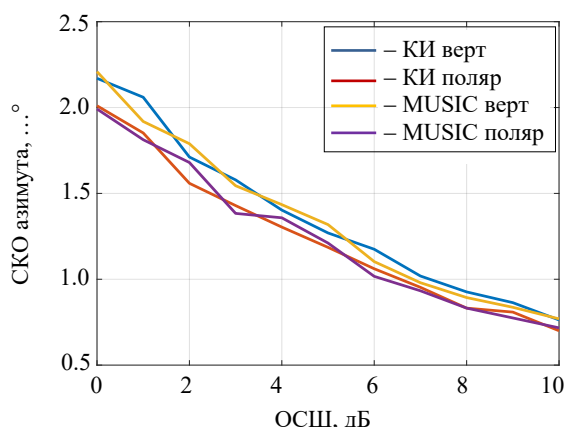


Рис. 4. Зависимость СКО оценки азимута от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0$

Fig. 4. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0$

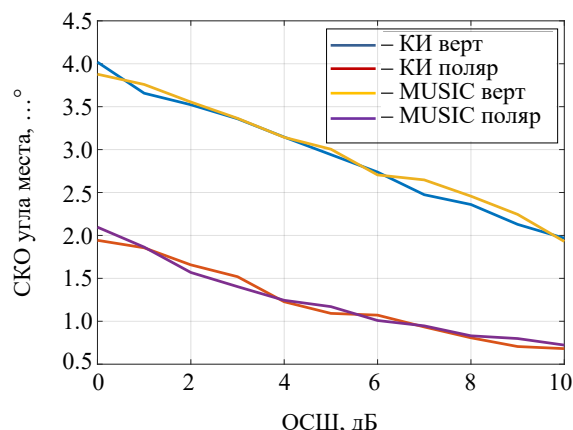


Рис. 5. Зависимость СКО оценки угла места от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0$

Fig. 5. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0$

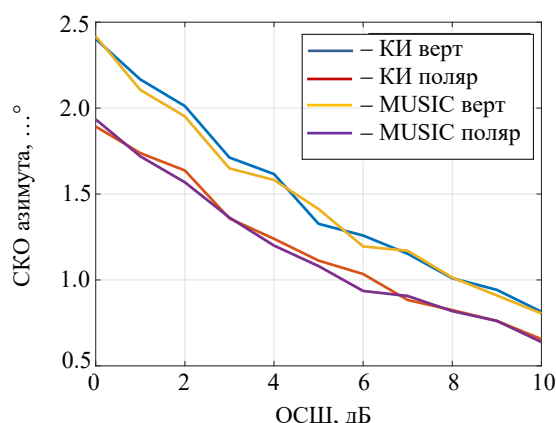


Рис. 6. Зависимость СКО оценки азимута от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

Fig. 6. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

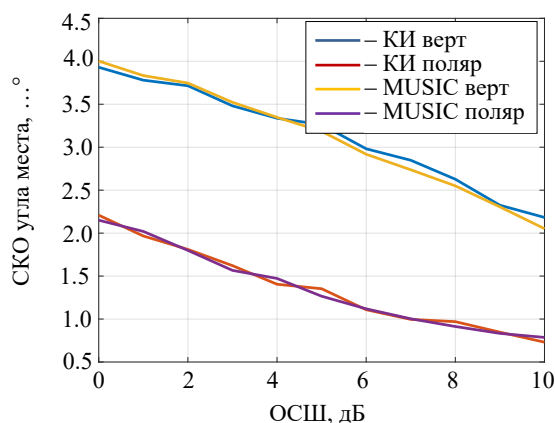


Рис. 7. Зависимость СКО оценки угла места от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

Fig. 7. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

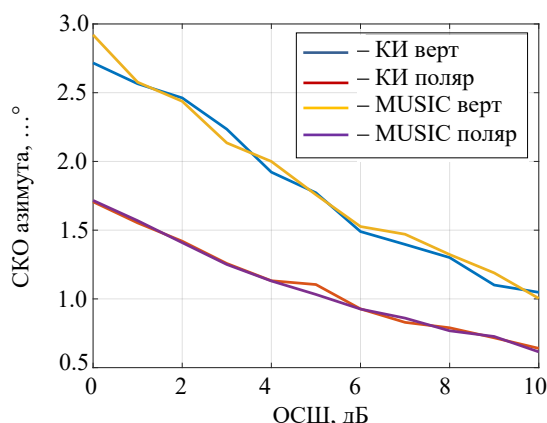


Рис. 8. Зависимость СКО оценки азимута от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 1$

Fig. 8. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 1$

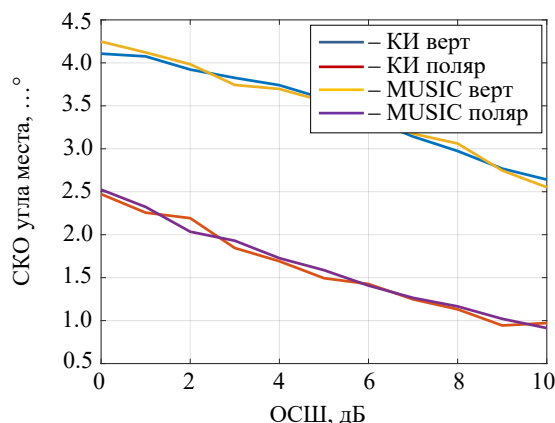


Рис. 9. Зависимость СКО оценки угла места от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 1$

Fig. 9. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 1$

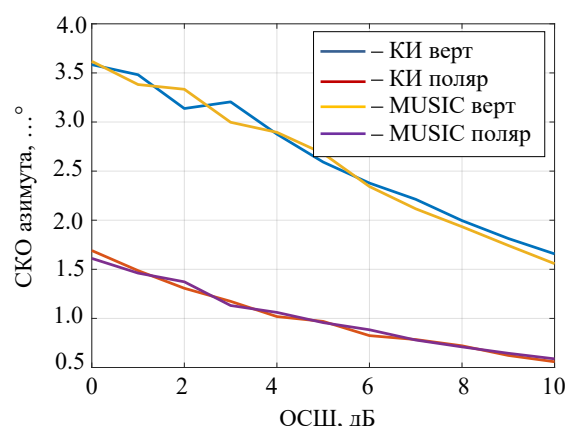


Рис. 10. Зависимость СКО оценки азимута от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 2$

Fig. 10. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 2$

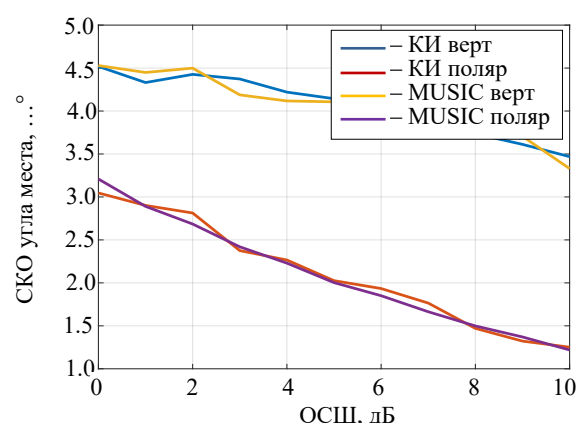


Рис. 11. Зависимость СКО оценки угла места от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 2$

Fig. 11. Dependence of the STD of the azimuth estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 2$

ницах рабочего диапазона (3 и 30 МГц).

Следует отметить, что оба реализованных метода – поляризационный корреляционный интерферометр и поляризационный MUSIC – обеспечивают сопоставимую точность оценки угловых координат и наследуют основные свойства своих классических прототипов. В частности, поляризационный КИ отличается меньшей вычислительной сложностью и высокой производительностью, что делает его предпочтительным для систем реального времени. В то же время поляризационный MUSIC обеспечивает более высокое разрешение при наличии близкорасположенных источников.

Таким образом, выбор между методами следует осуществлять с учетом конкретных требований к системе: для задач, где критична

скорость обработки, предпочтителен поляризационный корреляционный интерферометр; для задач, требующих максимального разрешения, целесообразно использовать поляризационный MUSIC.

Результаты СКО поляризационных параметров представлены на рис. 14–21.

По полученным зависимостям СКО наклона эллипса поляризации от ОСШ при разных видах поляризации можно сделать следующие выводы:

- при $E_{0h}/E_{0v} = 0$ СКО оценки наклона эллипса поляризации минимальна по сравнению с другими случаями, что объясняется простой поляризационной структурой сигнала;
- при $E_{0h}/E_{0v} = 2$ и $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$ требуется большое значение ОСШ для достижения

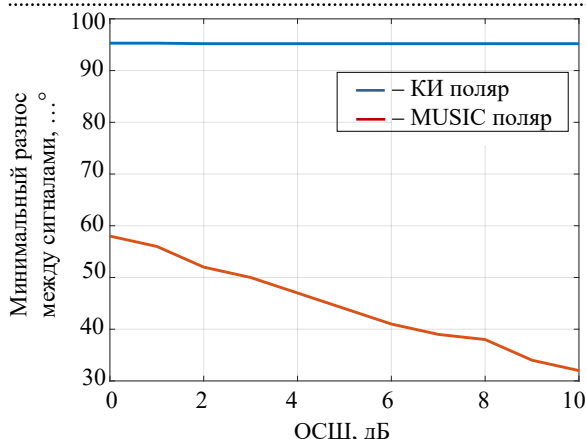


Рис. 12. Зависимость минимального разнота между сигналами от ОСШ на частоте 3 МГц

Fig. 12. Dependence of the minimum distance between the signals on the SNR at a frequency of 3 MHz

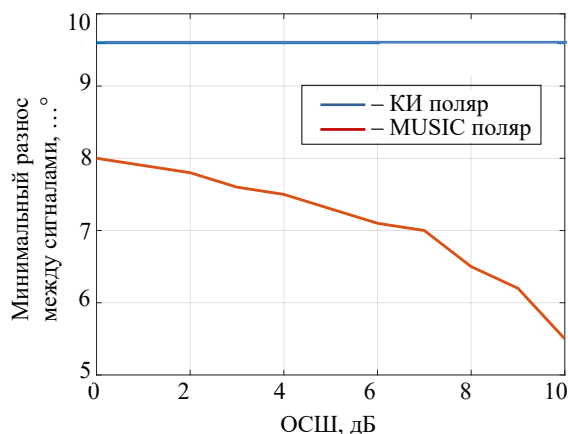


Рис. 13. Зависимость минимального разнота между сигналами от ОСШ на частоте 30 МГц

Fig. 13. Dependence of the minimum distance between the signals on the SNR at a frequency of 30 MHz

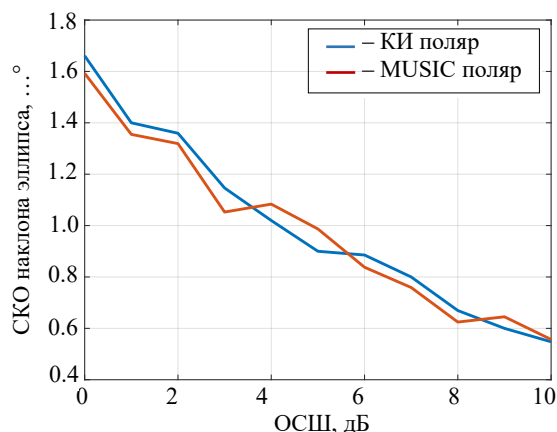


Рис. 14. Зависимость СКО оценки наклона эллипса от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0$

Fig. 14. Dependence of the STD of the ellipse slope estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0$

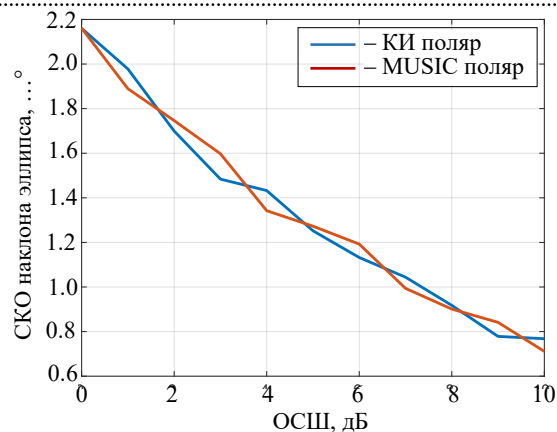


Рис. 15. Зависимость СКО оценки угла эллиптичности от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0$

Fig. 15. Dependence of the STD of the ellipticity angle estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0$

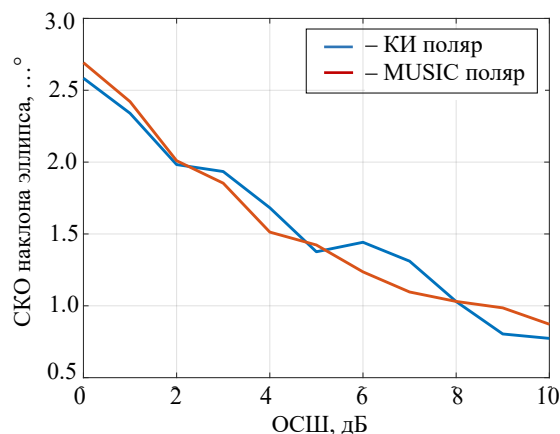


Рис. 16. Зависимость СКО оценки наклона эллипса от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

Fig. 16. Dependence of the STD of the ellipse slope estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

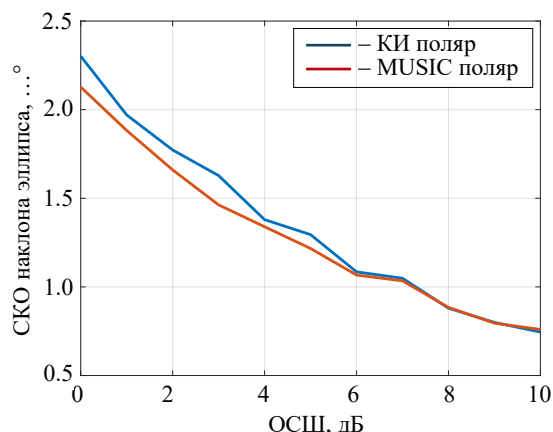


Рис. 17. Зависимость СКО оценки угла эллиптичности от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

Fig. 17. Dependence of the STD of the ellipticity angle estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 0.5$

той же точности оценки наклона эллипса, что и в случае линейной поляризации. Это связано с

более сложной структурой поля;

– при $E_{0h}/E_{0v} = 1$ однозначная оценка уг-

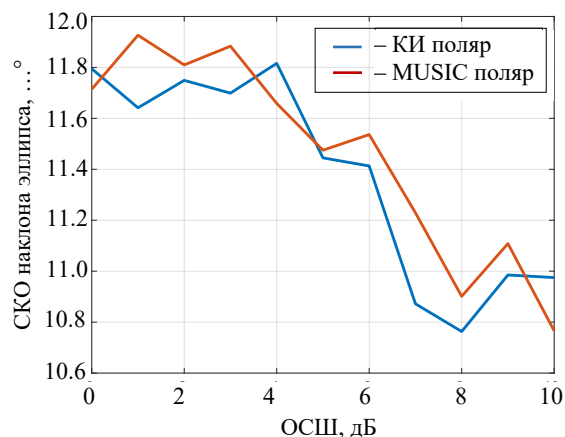


Рис. 18. Зависимость СКО оценки наклона эллипса от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 1$

Fig. 18. Dependence of the STD of the ellipse slope estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 1$

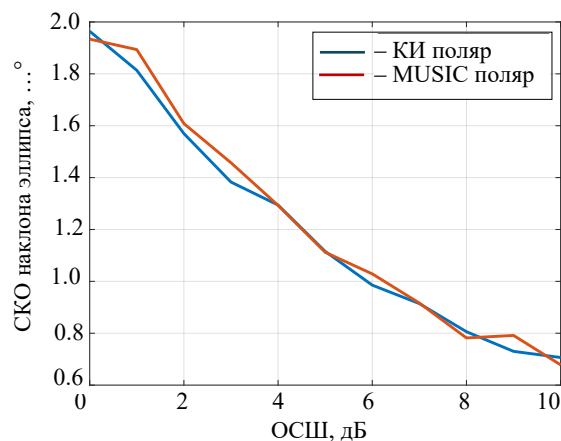


Рис. 19. Зависимость СКО оценки угла эллиптичности от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 1$

Fig. 19. Dependence of the STD of the ellipticity angle estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 1$

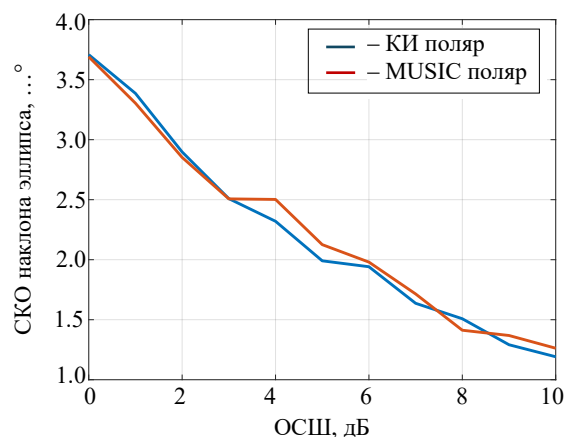


Рис. 20. Зависимость СКО оценки наклона эллипса от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 2$

Fig. 20. Dependence of the STD of the ellipse slope estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 2$

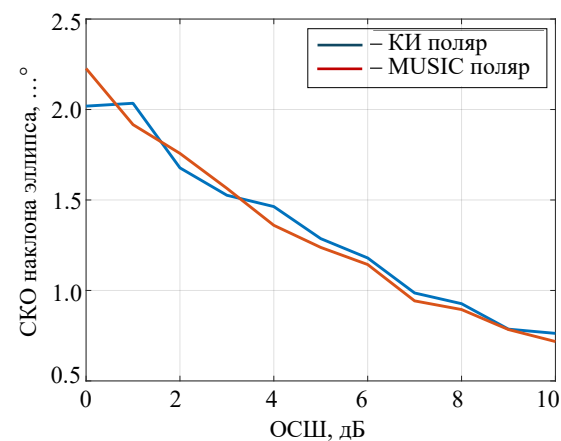


Рис. 21. Зависимость СКО оценки угла эллиптичности от ОСШ при $E_{0h}/E_{0v} = 2$

Fig. 21. Dependence of the STD of the ellipticity angle estimate on the SNR at $E_{0h}/E_{0v} = 2$

ла наклона эллипса поляризации невозможна, поскольку эллипс вырождается в окружность. В этом случае поляризация является круговой, и направление наклона эллипса теряет физический смысл, так как поляризационный эллипс инвариантен относительно поворота.

Анализ зависимости СКО угла эллиптичности от ОСШ показывает, что точность оценки угла эллиптичности слабо зависит от типа поляризации. Так, при ОСШ, равном 10 дБ, СКО угла эллиптичности составляет менее 1° независимо от вида поляризации.

Заключение. Предложенные в статье методы – поляризационный корреляционный интерферометр и поляризационный алгоритм MUSIC – обеспечивают существенное повышение точности оценки угловых координат

ИРИ по сравнению с традиционными подходами, особенно в случае приема волн с эллиптической поляризацией. Достижимый выигрыш в точности оценки пространственных параметров может составлять несколько раз.

Кроме того, использование антенной системы, построенной на основе триортогональных антенн, в сочетании с разработанными алгоритмами позволяет не только определять направление прихода сигнала, но и оценивать полную поляризационную структуру принимаемой реализации.

Совместная оценка пространственных и поляризационных параметров открывает возможность для более полного восстановления траектории распространения волны, что повышает эффективность радиомониторинга и радиолокационных систем в сложной электромагнитной обстановке.

Список литературы

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 564 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.
3. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / пер. с англ. И. В. Ковалевского, А. П. Кропоткина; под ред. А. А. Корчака. М.: Мир, 1973. 504 с.
4. Коршунов Д. В., Васильев А. С., Лапшин Э. В. Анализ факторов, влияющих на качество радиосвязи в КВ-диапазоне. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih-na-kachestvo-radiosvyazi-v-kv-diapazone/viewer> (дата обращения: 12.02.2023).
5. Сивоконь В. П. Поляризация коротких волн в ионосферном канале связи // Электросвязь. 2007. № 7. С. 55–58.
6. Булатов Н. Д., Савин Ю. К. Статистические характеристики поляризационных замираний КВ-сигнала // Электросвязь. 1971. № 2. С. 14–16.
7. Компактные приземные антенны для поляризационно-избирательного приема в составе систем радиомониторинга / Д. В. Лучин, А. М. Плотников, А. П. Трофимов, В. В. Юдин // Электросвязь. 2015. № 8. С. 44–48.
8. Лучин Д. В., Сподобаев М. Ю. Системы ДКМВ-радиосвязи: разработка, производство и перспективные решения // Вестн. Самар. аэрокосмического ун-та. 2014. № 2 (44). С. 74–79.
9. Грибов Г. С. Перспективы использования двухполяризационных антенных элементов в составе антенных решеток для задач радиомониторинга // Научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий // V науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 4–6 окт. 2023. СПб., 2024. С. 18–23.
10. Грибов Г. С. Оценка поляризационных и пространственных параметров сигнала источника радиоизлучения с помощью триортогональной антенны // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 51–64. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-51-64
11. Баланис К. А., Иоанидес П. И. Мир электроники. Введение в смарт-антенны / пер. с англ. К. В. Юдинцева; под ред. В. В. Попова, М. Д. Парнеса. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
12. Нечаев Ю. Б., Зотов С. А., Макаров Е. С. Сверхразрешающие алгоритмы в задаче азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток // Антенны. 2007. № 7 (122). С. 29–34.
13. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 197 с.
14. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
15. Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Лигтхарт Л. П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1: Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2012. 380 с.
16. Шевченко М. Е. Алгоритмы совместного обнаружения и пеленгования на основе методов сигнальных подпространств. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 159 с.
17. Петров В. П., Шауэрман А. К. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решетках // Вестн. СибГУТИ. 2011. № 2. С. 53–62.
18. Ермолаев В. Т., Мальцев А. А., Родюшкин К. В. Статистические характеристики критериев AIC и MDL в задаче оценки числа источников многомерных сигналов в случае короткой выборки // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 12. С. 1062–1069.
19. R&S® ADD011SR. Super-Resolution HF Direction Finding Antenna: Product Brochure. Version 01.00. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/3684_0401_12/ADD011SR_bro_en_3684-0401-12_v0100.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

Информация об авторе

Грибов Григорий Сергеевич – аспирант по направлению "Электроника, радиотехника и системы связи" (2025, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), инженер 1-й категории АО «НИИ "Вектор"». Автор 13 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; радиомониторинг; радиопеленгование; цифровая обработка сигналов. Адрес: АО «НИИ "Вектор"», ул. Академика Павлова, д. 14а, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ggribov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>

References

1. Al'pert Ya. L. *Rasprostranenie ehlektromagnitnyh voln i ionosfera* [Electromagnetic Wave Propagation and the Ionosphere]. 2nd ed. Moscow, *Nauka*, 1972, 564 p. (In Russ.)
2. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of Ionosphere]. Moscow, *Nauka*, 1988, 528 p. (In Russ.)
3. Davies K. *Ionospheric Radio Waves*. Waltham, Blaisdell Pub. Co, 1969, 504 p.
4. Korshunov D. V., Vasiliev A. S., Lapshin E. V. Analysis of Factors Affecting the Quality of Radio Communication in the HF band. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-faktorov-vliyayuschih>

na-kachestvo-radiosvyazi-v-kv-diapazone/viewer (accessed: 12.02.2023). (In Russ.)

5. Sivokon V. P. Polarization of Short Waves in the Ionospheric Communication Channel. *Electrosvyaz*, 2007, no. 7, pp. 55–58. (In Russ.)

6. Bulatov N. D., Savin Yu. K. Statistical Characteristics of Polarization Fading of the HF Signal. *Elektrosvyaz*. 1971, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.)

7. Luchin D. V., Plotnikov A. M., Trofimov A. P., Yudin V. V. Compact Ground-Level Antennas for Polarization-Selective Reception as Part of Radio Monitoring Systems. *Telecommunications*. 2015, no. 8, pp. 44–48. (In Russ.)

8. Luchin D. V. Spodobaev M. Yu. HF Radio Communication Systems: Development, Production and Perspective Solutions. *VESTNIK of Samara University*. 2014, no. 2 (44), pp. 74–79. (In Russ.)

9. Gribov G. S. *Perspektivy ispolzovaniya dvuhpolarizacionnykh antennykh elementov v sostave antennykh reshetok dlya zadach radiomonitoringa* [Prospects for the Use of Dual-Polarization Antenna Elements as Part of Antenna Arrays for Radio Monitoring Tasks]. Scientific, Engineering and Production Problems of Creating Technical Means for Monitoring the Electromagnetic Field Using Innovative Technologies. V Scientific and Technical Conf., St Petersburg, 4–6 Oct. 2023. SPb., 2024, pp. 18–23. (In Russ.)

10. Gribov G. S. Estimation of Polarization and Spatial Parameters of a Radio Source Signal Using Triorthogonal Antenna. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 51–64. (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-51-64

11. Balanis C. A., Ioannides P. I. Introduction to Smart Antennas. San Rafael, Morgan & Claypool, 2007, 174 p.

12. Nechaev Yu. B., Zotov S. A., Makarov E. S. Super-Resolution Algorithms in the Problem of Azi-

muthal Radio Direction Finding Using Ring Antenna Arrays. *Antennas*. 2007, no. 7, pp. 29–34. (In Russ.)

13. Ratynskiy M. V. *Adaptatsiya i sverkhrazresheniye v antennykh reshetkakh* [Adaptation and Super-Resolution in Antenna Arrays]. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2003, 200 p. (In Russ.)

14. Kanareykin D. B., Pavlov N. F., Potekhin V. A. *Polyarizatsiya radiolokatsionnykh signalov* [Polarization of Radar Signals]. Moscow, *Sovetskoye radio*, 1966, 440 p. (In Russ.)

15. Tatarinov V. N., Tatarinov S. V., Ligtkhart L. P. *Vvedeniye v sovremennuyu teoriyu polyarizatsii radiolokatsionnykh signalov* [Introduction to Modern Radar Signal Polarization Theory]. 2nd ed. Tomsk, *Izd-vo Tomskogo universiteta*, 2012, 380 p. (In Russ.)

16. Shevchenko M. E. *Algoritmy sovmestnogo obnaruzheniya i pelengovaniya na osnove metodov signal'nykh podprostranstv* [Algorithms for joint detection and direction finding based on signal subspace methods]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2013, 159 p. (In Russ.)

17. Petrov V. P., Shauerman A. K. Spectral Method to Estimate Signal Source Direction in Adaptive Arrays. *Vestnik SIBGUTI*. 2011, vol. 14, no. 2, pp. 53–62. (In Russ.)

18. Ermolaev V. T., Maltsev A. A., Rodyushkin K. V. Statistical Characteristics of the AIC and MDL Criteria in the Problem of Estimating the Number of Sources of Multidimensional Signals in the Case of a Short Sample. *News of universities. Radiophysics*. 2001, no. 12, pp. 1062–1069. (In Russ.)

19. R&S® ADD011SR. Super-Resolution HF Direction Finding Antenna: Product Brochure. Version 01.00. Available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/3684_0401_12/ADD011SR_bro_en_3684-0401-12_v0100.pdf (accessed: 17.03.2025).

Information about the author

Grigory S. Gribov, Postgraduate student in "Electronics, Radio Engineering and Communication Systems" (2025, Saint Petersburg Electrotechnical University), engineer of the 1st category of JSC «Research Institute "Vector"». The author of 13 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; radio monitoring; radio direction finding; digital signal processing.

Address JSC «Research Institute "Vector"», 14a, Academician Pavlov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: ggribov@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-1338-9187>

Исследование влияния степени легирования квантовых ям на рабочую температуру QWIP

А. Л. Дудин², В. И. Зубков¹, Л. С. Богословская^{1,2✉}

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

²АО "Светлана-Рост", Санкт-Петербург, Россия

✉Lana.stoliarowa@yandex.ru

Аннотация

Введение. Инфракрасные фотодетекторы на основе квантовых ям (QWIP) являются одними из ключевых компонентов современных систем инфракрасного видения. QWIP широко применяются в различных областях, включая космические исследования, медицину и др. Одна из ключевых характеристик QWIP – температура BLIP (background limited performance). Эта температура определяется из условия равенства фонового и темнового токов, протекающих через фотодетектор, и является рабочей температурой фотодетектора. Увеличение рабочей температуры позволяет значительно снизить требования к системе охлаждения. Поскольку фоновый ток зависит от условий окружающей среды и апертуры криостата, целесообразно снижать значения темнового тока, которые напрямую зависят от степени легирования квантовых ям. Однако легирование влияет на чувствительность фотодетектора, поэтому необходимо подобрать оптимальный уровень легирования, позволяющий найти компромисс между снижением чувствительности и уровня темнового тока.

Цель работы. Исследование влияния степени легирования квантовых ям на основе системы материалов GaAs/AlGaAs на температуру BLIP.

Материалы и методы. Для проведения эксперимента методом молекулярно-пучковой эпитаксии были изготовлены тестовые фотоприемники. Параметры образцов подбирались таким образом, чтобы длина волны максимума спектральной чувствительности находилась в диапазоне 8...9 мкм. Варьируемым параметром являлась степень легирования квантовых ям кремнием. После прохождения технологического маршрута планарной модификации на всех тестовых фотоприемниках были сняты вольт-амперные характеристики в диапазоне температур 65...77 К и построены графики статической токовой чувствительности.

Результаты. Показано, что снижение уровня легирования с $9.0 \cdot 10^{17}$ до $4.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ приводит к значительному уменьшению темнового тока в рабочем интервале напряжений. Это позволило повысить температуру BLIP с 69 до 71 К. При этом наблюдалось ожидаемое снижение фоточувствительности, однако ее значение оставалось выше порогового уровня 0.15 А/Вт.

Заключение. Полученные данные демонстрируют, что оптимизация уровня легирования квантовых ям в QWIP позволяет уменьшить уровень темнового тока фотодетектора. Такой фотодетектор можно использовать при более высоких температурах.

Ключевые слова: инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами, темновой ток, фоточувствительность, вольт-амперные характеристики, BLIP

Для цитирования: Дудин А. Л., Зубков В. И., Богословская Л. С. Исследование влияния степени легирования квантовых ям на рабочую температуру QWIP // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 35–43.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-35-43

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарят коллег из АО "Светлана-Рост" за подготовку образцов и осуществление возможности проведения необходимых измерений в сжатые сроки.

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; принята к публикации после рецензирования 02.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026



Investigation of the Effect of Quantum Well Doping on QWIP Operating Temperature

Anatoliy L. Dudin², Vasily I. Zubkov¹, Lana S. Bogoslovskaya^{1,2✉}

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Joint Stock Company "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

✉ Lana.stoliarowa@yandex.ru

Abstract

Introduction. Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) are among the key components of modern infrared imaging systems and are widely used for various applications, including space research, medical diagnostics, etc. One of the most important characteristics of a QWIP is the background-limited performance (BLIP) temperature, which is determined based on the equality condition between the background current and the dark current flowing through the photodetector. This parameter represents the operating temperature of the photodetector. Increasing the operating temperature can significantly reduce the requirements imposed on the cooling system. Since the background current depends on environmental conditions and the cryostat aperture, it is primarily required to reduce the dark current values. The dark current is strongly dependent on the doping level of the quantum wells. However, the doping concentration also affects the photodetector sensitivity, creating a trade-off between sensitivity and dark current level.

Aim. To investigate the effect of the doping level of quantum wells based on the GaAs/AlGaAs material system on the BLIP temperature.

Materials and methods. Experimental photodetectors were fabricated by molecular beam epitaxy. The parameters of the samples were selected to ensure a peak spectral response wavelength in the range of 8...9 μm. The variable parameter was the doping level of the quantum wells with silicon. After completing the planar processing technological route, the current–voltage characteristics of all test photodetectors were measured in the temperature range of 65...77 K, and the corresponding curves of static current sensitivity were plotted.

Results. A reduction in the doping level from $9.0 \cdot 10^{17}$ to $4.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ was found to lead to a significant decrease in the dark current within the operating voltage range. This made it possible to increase the BLIP temperature from 69 to 71 K. This was associated with the expected decrease in photosensitivity; however, its value remained above the threshold level of 0.15 A/W.

Conclusion. The obtained data demonstrate that optimization of the quantum well doping level in QWIPs provides for a reduction in the photodetector dark current. As a result, the device can be operated at higher temperatures.

Keywords: quantum well infrared photodetectors, dark current, photosensitivity, current–voltage characteristics, BLIP

For citation: Dudin A. L., Zubkov V. I., Bogoslovskaya L. S. Investigation of the Effect of Quantum Well Doping on QWIP Operating Temperature. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 35–43.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-35-43

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

Acknowledgments. The authors thank their colleagues at JSC Svetlana-Rost for preparing the samples and making it possible to carry out the necessary measurements in a short time.

Submitted 28.01.2026; accepted 02.04.2026; published online 29.06.2026

Введение. Матричные инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами (Quantum Well Infrared Photodetector – QWIP) представляют собой важный класс полупроводниковых устройств, предназначенных для обнаружения среднего (3...5 мкм) [1] и длинноволнового

(8...14 мкм) [2] инфракрасного излучения. Благодаря многочисленным исследованиям, посвященным стабилизации и оптимизации их параметров (например, описанным в [3–5]), в настоящее время QWIP можно считать устоявшейся технологией на рынке ИК-фотодетекторов [6].

В настоящий момент QWIP пользуются спросом в астрономии [7], космических приложениях [8], медицине [9] и многих других областях гражданского назначения [10].

Один из наиболее важных параметров для оценки производительности и эффективности фотодетектора – температура фоновограниченного режима работы (Background-Limited Infrared Performance – BLIP) [11]. При этой температуре фотодетектор регистрирует предельно малые сигналы, ограниченные только флуктуацией фона.

Температура BLIP определяется из условия равенства тока собственных шумов (темнового тока), обусловленных термогенерацией носителей заряда, и тока, индуцированного фоновым излучением (фоновый ток) в QWIP. Поэтому под температурой BLIP обычно подразумевается рабочая температура фотодетектора.

Самое простое представление n -QWIP, созданного на основе GaAs/AlGaAs, показано на рис. 1 [12]. Работа детектора основана на фотоэмиссии электронов из квантовых ям. Контакты с обеих сторон выполнены из GaAs n -типа. По своей сути данное устройство является униполярным фоторезистором.

Существует 3 механизма генерации темнового тока:

1. Термоионная эмиссия – носители заряда (электроны) получают достаточно тепловой энергии, чтобы преодолеть барьер квантовой ямы и попасть в зону проводимости. В зоне проводимости они ускоряются электрическим полем и создают ток.

2. Туннелирование через вершину барьера – при достаточном значении напряжения смещения электроны могут туннелировать через небольшой потенциальный барьер, возникающий из-за изгиба зон.

3. Туннелирование через барьер – волновые функции электронов на основных (низших) уровнях соседних квантовых ям имеют некоторое перекрытие и при определенных условиях (при очень низких температурах) могут туннелировать непосредственно через барьер.

Более подробно о механизмах генерации темнового тока изложено в [13].

При широких барьерах и не слишком больших напряжениях смещения принципиально неустранимым механизмом возникновения темнового тока в QWIP является термоионная эмиссия электронов из квантовых ям. Плотность темнового тока, эмитированного множеством квантовыми ямами, в QWIP можно оценить с помощью соотношения [12]

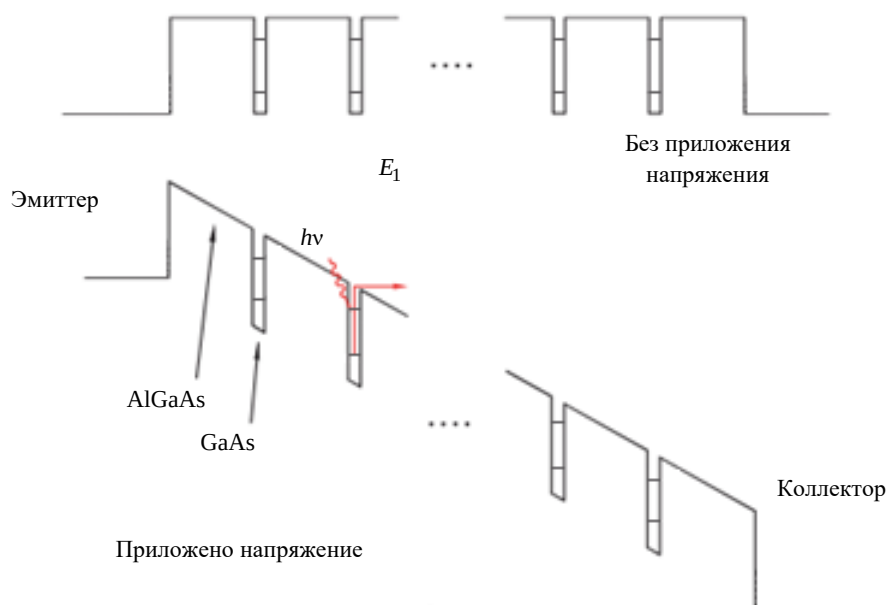


Рис. 1. Схематичный профиль зоны проводимости n -QWIP на основе GaAs/AlGaAs при нулевом (сверху) и ненулевом (снизу) смещении. Заселение квантовых ям электронами обеспечивается легированием кремнием

Fig. 1. Schematic conduction band-edge profile of a GaAs/AlGaAs n -QWIP under zero (above) and finite (below) bias. The electron population in the n -type wells is provided by silicon doping

$$j_{\text{dark}} \sim kT \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{kT}\right),$$

где k – постоянная Больцмана; T – рабочая температура фотодетектора; $E_{\text{акт}}$ – энергия термической активации, равная разности между энергетическим уровнем потенциального барьера и энергией Ферми в квантовой яме.

Эффективность работы QWIP в значительной степени определяется значением коэффициента поглощения падающего электромагнитного излучения в активной области. Ключевым параметром, управляющим данным процессом, является концентрация свободных носителей заряда (электронов для QWIP n -типа) в зоне проводимости квантовых ям.

Для того чтобы обеспечить достаточную плотность состояний [14], квантовые ямы QWIP легируют до значений порядка $10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [15, 16]. Концентрация легирующей примеси существенно влияет на положение уровня Ферми и на темновой ток [15].

Поскольку температура BLIP определяется условием равенства темнового и фонового токов, уменьшение темнового тока смещает точку их пересечения в область более высоких температур. Это означает, что для достижения темновым током значения фонового потребуется более высокая температура.

Один из способов уменьшения темнового тока – снижение степени легирования квантовых ям QWIP. Однако при этом линейно уменьшается поглощение излучения [17].

Снижение фоточувствительности по линейному закону менее существенно по сравнению с экспоненциальным подавлением темнового тока. Следовательно, существует такая концентрация доноров в яме, при которой можно найти компромисс между темновым током и фоточувствительностью детектора.

Целью описываемой работы было изучение влияния уровня легирования квантовых ям QWIP на значение температуры BLIP и выбор его оптимального значения.

Материалы и методы исследования. В рамках проведения эксперимента на 100-миллиметровых подложках GaAs ориентации (100) было изготовлено несколько образцов

QWIP, образующих 2 серии (А и В) с различающимися параметрами.

Эпитаксиальные слои выращивались на российской установке молекулярно-пучковой эпитаксии, разработанной ЗАО "НТО" STE35.

Изготовленные образцы представляли собой массив квантовых ям, заключенный между двумя высоколегированными слоями GaAs (контактными слоями). Массив квантовых ям (фоточувствительная область структур) содержал 50 квантовых ям GaAs, разделенных барьерами AlGaAs.

Параметры квантовых ям (ширина ям и высота барьеров) подбирались таким образом, чтобы обеспечить наличие двух уровней в зоне проводимости, а именно – 50 и 300 Å (ширина квантовой ямы и барьера соответственно), содержание алюминия в барьере 29 % (высота барьера). Многочисленные эксперименты, проведенные на АО "Светлана-Рост", показывают, что выбранные параметры обеспечивают максимум спектральной чувствительности на длинах волн в диапазоне от 8.25 до 8.75 мкм.

Контроль параметров эпитаксиальных структур осуществлялся с помощью анализа спектров фотолюминесценции. По форме и положению пика спектра фотолюминесценции делались выводы об однородности массива квантовых ям и о положении первого (основного) уровня (E_1 , рис. 1) в квантовых ямах соответственно.

Квантовые ямы легировались *in situ* донорной примесью – кремнием. Варьируемым параметром являлась концентрация примеси в квантовой яме (табл. 1).

Для проведения измерений на выращенных гетероструктурах были изготовлены тестовые фотоприемники [18]. Посредством планарной технологии были сформированы следующие структурные элементы, соответствующие матрицам QWIP:

1. Дифракционная решетка – ключевой элемент, обеспечивающий эффективное поглощение электромагнитного излучения в гетероструктуре с квантовыми ямами. Поглощение излучения и

Табл. 1. Данные образцов

Tab. 1. Sample data

Серия образцов	Концентрация легирующей примеси, см^{-3}
А	$9.0 \cdot 10^{17}$
В	$4.5 \cdot 10^{17}$

межподзонные переходы электронов в квантовых ямах возможны только при наличии у излучения компоненты электрического поля, направленной вдоль квантовых ям. Поскольку падающее излучение обычно направлено по нормали к поверхности, его волновой вектор лежит в плоскости ям, что делает прямое поглощение невозможным. Дифракционная решетка спроектирована таким образом, чтобы первый порядок дифракции (максимум излучения) отклонялся под максимальным углом к нормали.

2. Омические контакты к высоколегированным слоям GaAs, сформированные методом вакуумного электронно-лучевого напыления многослойной металлической системы на основе сплава Ni, Ge, Au с последующим отжигом.

3. Изоляция пикселей, включающая 2 ключевых этапа – формирование глубоких мезоструктур посредством плазмохимического травления в индуктивно связанной плазме до достижения нижнего контактного слоя и последующую пассивацию поверхности пленкой диэлектрика.

4. Индиевые столбики – для монтажа (гибридизации) тестовых фотоприемников методом перевернутого кристалла (технология flip-chip). Совмещение тестового фотоприемника с подкристалльной платой осуществлялось на установке Tresky T-3002 FC3.

Тестовые фотоприемники, смонтированные на подкристалльные платы, образовывали микросборки. Каждая микросборка закреплялась на медном держателе с помощью термопроводящей пасты и помещалась в заливной азотный криостат JANIS VPF-100. Держатель соединялся проволочными проводниками с керамическими площадками, подключенными к BNC-кабелю внутри криостата. Электрическое напряжение прикладывалось к структуре с помощью измерительного прибора Keithley 4200.

Аппаратно-программным комплексом Keithley 4200 были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) на различных температурах в темноте и в условиях фонового излучения. Темновые условия обеспечивались за счет использования холодного экрана, который полностью экранировал криостат от фонового излучения.

Фоновый ток измерялся в холодном экране с диафрагмой в апертуре $f/1.5$ при температуре окружающей среды 300 К. Схема стандарт-

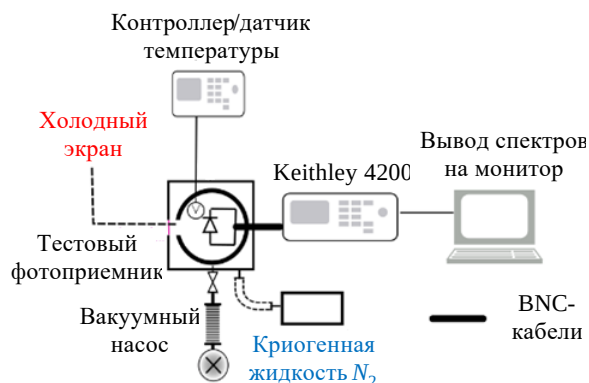


Рис. 2. Схематическое изображение стандартной методики измерений ВАХ QWIP

Fig. 2. Schematic representation of the standard IV measurement technique for QWIP

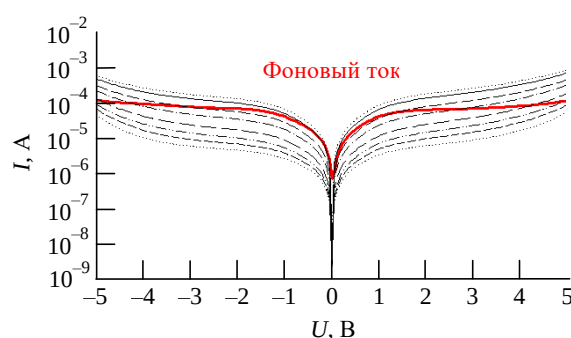


Рис. 3. Семейство темновых ВАХ QWIP, измеренных при температурах от 65 до 77 К. Красной линией выделена фоновая ВАХ

Fig. 3. QWIP dark current-voltage characteristics (I-V curves), measured in the temperature range from 65 to 77 K. The background I-V curve measured at 65 K is highlighted by the red line

ного экспериментального стенда для измерения представлена на рис. 2.

Типичное семейство темновых ВАХ показано на рис. 3. Температура, при которой измерялась темновая ВАХ, совпадающая с фоновой ВАХ на рабочем напряжении фотоприемника, считалась температурой BLIP.

Для контроля влияния достаточности степени легирования также были построены графики зависимости статической токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения для всех образцов. Значение токовой чувствительности при каждом значении приложенного напряжения:

$$S = \frac{\Delta I}{JA},$$

где S – значение токовой чувствительности, А/Вт; ΔI – разность между протекающими через тестовый фотоприемник токами при облу-

чении его ИК-излучением и в отсутствие облучения на заданном напряжении смещения, A ; J – плотность излучения, падающего на тестовый фотоприемник на заданной длине волны, Вт/см²; A – площадь фоточувствительной поверхности тестового фотоприемника размерами 500 × 500 мкм. Более подробно расчет и построение графиков статической токовой чувствительности изложены в [13].

Результаты. Пики спектральной чувствительности образцов серий А и В наблюдались при 8.37 и 8.31 мкм соответственно. Близкое совпадение спектральных характеристик подтверждает идентичность всех параметров структур, за исключением уровня легирования, что обосновывает корректность их сравнительного анализа.

На рис. 4 представлены типичные темновые ВАХ образцов серий А и В при температуре 65 К. Темновой ток через образец серии В в рабочем интервале напряжений (1.5...3.0 В) практически в 6 раз ниже, чем ток через образец серии А.

На рис. 5 представлены графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения образцов серий А и В при длине волны, соответствующей максимуму их спектральной фоточувствительности. Для образца серии В наблюдается снижение токовой чувствительности. В соответствии с ожиданиями уменьшение значений данного параметра оказалось менее выраженным по сравнению со снижением значений темнового тока. На рабочем напряжении 3 В чувствительность образца серии А превышала аналогичный показатель образца серии В в 1.5 раза.

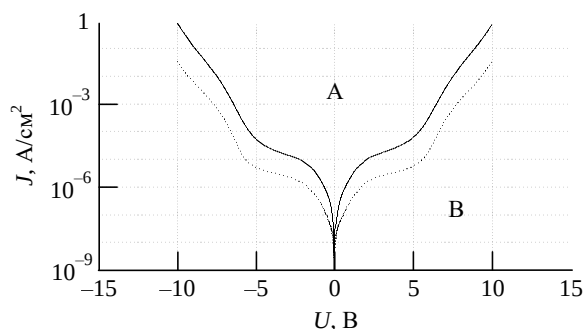


Рис. 4. ВАХ при температуре 65 К. По вертикали приведены значения плотности темнового тока, по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 4. Current-voltage characteristics at a temperature of 65 K. The vertical axis shows the dark current density, and the horizontal axis shows the applied bias voltage

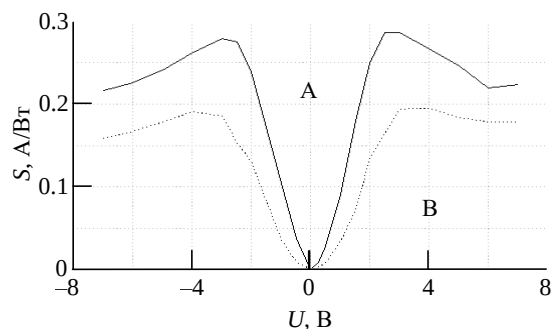


Рис. 5. Графики зависимости токовой чувствительности образцов в максимуме спектра фоточувствительности при температуре 77 К. По вертикали приведены расчетные значения токовой чувствительности; по горизонтали – значения приложенного напряжения смещения

Fig. 5. Spectra of static current sensitivity at the peak of the photosensitivity spectrum at a temperature of 77 K. The vertical axis shows the calculated values of current sensitivity, and the horizontal axis shows the applied bias voltage

Табл. 2. Результаты исследования

Tab. 2. Research results

Серия образцов	Концентрация примеси в квантовой яме, см ⁻³	Средняя температура BLIP, К
A	$9.0 \cdot 10^{17}$	69
B	$4.5 \cdot 10^{17}$	71

В табл. 2 сведены ключевые результаты исследования.

Закключение. Исследовано влияние степени легирования квантовых ям QWIP на значение температуры BLIP.

Результаты исследования показывают, что снижение уровня легирования квантовых ям приводит к уменьшению силы темнового тока. Это, в свою очередь, расширяет температурный диапазон работы фотодетектора в режиме фонового ограничения (BLIP).

Также результаты исследования свидетельствуют о снижении фоточувствительности при уменьшении степени легирования квантовых ям. Тем не менее, максимальное значение фоточувствительности превышает пороговый уровень 0.15 А/Вт, что подтверждает допустимость данного решения при оптимизации рабочих параметров фотодетектора.

Нивелировать эффект снижения фоточувствительности можно за счет оптимизации геометрических параметров дифракционных решеток. Применение дифракционных решеток способствует увеличению эффективности

поглощения оптического излучения на заданной длине волны, что приводит к росту фоточувствительности. При этом дифракционные решетки не влияют на силу темнового тока. Детальное исследование влияния различных конфигураций дифракционных решеток требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки описываемой работы.

Таким образом, практическим результатом проведенной работы является увеличение температуры BLIP тестовых образцов QWIP с 69 до 71 К при сохранении параметров фоточувствительности выше порогового значения 0.15 А/Вт. Достигнутый результат снижает требования к системе охлаждения, в том числе – уменьшает ее энергопотребление и стоимость эксплуатации.

Список литературы

1. Mid-infrared semiconductor optoelectronics / ed. by A. Krier. London: Springer, 2007. 752 p. doi: 10.1007/1-84628-209-8
2. QWIP: still the best solution for high-end applications in LWIR / R. Ivanov, S. Högnadóttir, D. Ramos, D. Evans, D. Visser, D. Rihtnesberg, A. Smuk, S. Becanovic, S. Sehlin, S. Almqvist, S. Smuk, L. Höglund, E. Costard // Infrared Technology and Applications XLIX. Proc. of SPIE. 2023. Vol. 12534. P. 356–364.
3. Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion Laboratory / S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, E. M. Luong, S. B. Rafol, J. M. Mumolo, D. Z. Ting, J. J. Bock, M. E. Ressler, M. W. Werner, P. D. LeVan, R. Chehayeb, A. Kukkonen, M. Levy, P. LeVan, M. A. Fauci // Infrared Physics & Technology. 2001. Vol. 42, iss. 3–5. P. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
4. QWIP structural optimization / K.-K. Choi, C.-H. Lin, K.-M. Leung, T. Tamir // Materials for Infrared Detectors II. Proc. of SPIE. 2002. Vol. 4795. P. 27–38. doi: 10.1117/12.453827
5. Berurier A., Nedelcu A. Optimization of light polarization sensitivity in QWIP detectors // Infrared Physics & Technology. 2013. Vol. 59. P. 118–124. doi: 10.1016/j.infrared.2012.12.025
6. An LWIR QWIP FPA with sub-5mK NETD and large dynamic range / H. Lu, N. Li, X. Zhou, Zh. Li, P. Chen, J. Xu, X. Li, W. Lu // Infrared Physics & Technology. 2025. Vol. 144. Art. № 105629. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105629
7. Das M. K., Lal R. K. Modeling of Quantum Well Infrared Photo Detector for Long Wavelength Infrared Detection // IETE J. of Research. 2017. Vol. 63, iss. 5. P. 719–727. doi: 10.1080/03772063.2017.1313138
8. Optimisation of QWIP detectors for space applications / S. Smuk, A. Gromov, J. Alverbro, P. Merken, T. Souverijns, D. Haga, H. Malm, C. Asplund, J. Borglind, S. Becanovic, P. Tinghag, H. Martijn, B. Hirschauer // Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5978. P. 397–406. doi: 10.1117/12.632799
9. Etteh N. E. I., Harrison P. Quantum mechanical scattering investigation of the dark current in quantum well infrared photodetectors (QWIPs) // Infrared Physics & Technology. 2003. Vol. 44, iss. 5–6. P. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
10. Downs C., Vandervelde T. E. Progress in infrared photodetectors since 2000 // Sensors. 2013. Vol. 13, iss. 4. P. 5054–5098. doi: 10.3390/s130405054
11. Bhan R. K., Dhar V. Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization // Opto-Electronics Review. 2019. Vol. 27, № 2. P. 174–193. doi: 10.1016/j.opelre.2019.04.004
12. Schneider H., Liu H. C. Quantum well infrared photodetectors: physics and applications. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. 248 p. doi: 10.1007/978-3-540-36324-8
13. Богословская Л. С., Дудин А. Л., Зубков В. И. Исследование влияния ширины барьера на рабочее напряжение QWIP // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 72–80. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-72-80
14. GaAs/AlGaAs Quantenfilm Photodetektoren für Kameras im 8...12µm-Bereich / H. Schneider, P. Koidl, M. Walther, J. Fleißner, J. Ziegler // tm-Technisches Messen. 1999. Vol. 66, № 9. P. 344–349.
15. Billaha A., Das M. K. Influence of doping on the performance of GaAs/AlGaAs QWIP for long wavelength applications // Opto-Electronics Review. 2016. Vol. 24, № 1. P. 25–33. doi: 10.1515/oere-2016-0006
16. I–V characterization of a quantum well infrared photodetector with stepped and graded barriers / F. Nutku, A. Erol, M. Gunes, L. B. Buklu, Y. Ergun, M. C. Arıkan // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 52, № 3. P. 585–593. doi: 10.1016/j.spmi.2012.06.010
17. Optimal doping density for quantum-well infrared photodetector performance / Y. Yang, H. C. Liu, W. Z. Shen, N. Li, W. Lu, Z. R. Wasilewski // IEEE J. of Quantum Electronics. 2009. Vol. 45, № 6. P. 623–628. doi: 10.1109/JQE.2009.2013119
18. Стандартизация технологий изготовления матриц для охлаждаемых тепловизоров – "тепло" или "холодно"? / А. Л. Дудин, Н. И. Кацавец, Д. М. Красовицкий, А. Г. Филаретов, В. П. Чалый // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 2. С. 114–119. doi: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.114.119

Информация об авторах

Дудин Анатолий Леонидович – специалист в области физики и технологии полупроводниковых приборов (1996, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), заместитель генерального директора по производству и технологическим разработкам АО "Светлана-Рост". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ; технология полупроводниковых приборов; QWIP.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Зубков Василий Иванович – доктор физико-математических наук (2008), профессор (2018), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела и физика полупроводников; нанoeлектроника; моделирование и диагностика квантово-размерных гетероструктур.

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

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Богословская Лана Сергеевна – магистр по специальности "Нанотехнологии и микросистемная техника" (2023, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер-технолог АО "Светлана-Рост", сквозной технолог по направлению QWIP. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – технология изготовления полупроводниковых микросхем; QWIP.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-9538-1055>

References

1. Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics. Ed. by Krier A. London, Springer, 2007, 752 p. doi: 10.1007/1-84628-209-8
2. Ivanov R., Högnadóttir S., Ramos D., Evans D., Visser D., Rihtnesberg D., Smuk A., Becanovic S., Sehlín S., Almqvist S., Smuk S., Höglund L., Costard E. QWIP: Still the Best Solution for High-End Applications in LWIR. Infrared Technology and Applications XLIX. Proc. of SPIE. 2023, vol. 12534, pp. 356–364.
3. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., Luong E. M., Rafol S. B., Mumolo J. M., Ting D. Z., Bock J. J., Ressler M. E., Werner M. W., LeVan P. D., Chehayeb R., Kukkonen A., Levy M., LeVan P., Fauci M. A. Quantum Well Infrared Photodetector Research and Development at Jet Propulsion Laboratory. Infrared Physics & Technology. 2001, vol. 42, iss. 3–5, pp. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
4. Choi K.-K., Lin C.-H., Leung K.-M., Tamir T. QWIP Structural Optimization. Materials for Infrared Detectors II. Proc. of SPIE. 2002, vol. 4795, pp. 27–38. doi: 10.1117/12.453827
5. Berurier A., Nedelcu A. Optimization of Light Polarization Sensitivity in QWIP Detectors. Infrared Physics & Technology. 2013, vol. 59, pp. 118–124. doi: 10.1016/j.infrared.2012.12.025
6. Lu H., Li N., Zhou X., Li Zh., Chen P., Xu J., Li X., Lu W. An LWIR QWIP FPA with Sub-5mK NETD and Large Dynamic Range. Infrared Physics & Technology. 2025, vol. 144, art. no. 105629. doi: 10.1016/j.infrared.2024.105629
7. Das M. K., Lal R. K. Modeling of Quantum Well Infrared Photo Detector for Long Wavelength Infrared Detection. IETE J. of Research. 2017, vol. 63, iss. 5, pp. 719–727. doi: 10.1080/03772063.2017.1313138
8. Smuk S., Gromov A., Alverbro J., Merken P., Souverijns T., Haga D., Malm H., Asplund C., Borglind J., Becanovic S., Tinghag P., Martijn H., Hirschauer B. Optimisation of QWIP Detectors for Space Applications. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. Proc. of SPIE. 2005, vol. 5978, pp. 397–406. doi: 10.1117/12.632799
9. Etteh N. E. I., Harrison P. Quantum Mechanical Scattering Investigation of the Dark Current in Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs). Infrared Physics & Technology. 2003, vol. 44, iss. 5–6, pp. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
10. Downs C., Vandervelde T. E. Progress in Infrared Photodetectors Since 2000. Sensors. 2013, vol. 13, iss. 4, pp. 5054–5098. doi: 10.3390/s130405054
11. Bhan R. K., Dhar V. Recent Infrared Detector Technologies, Applications, Trends and Development of HgCdTe Based Cooled Infrared Focal Plane Arrays and Their Characterization. Opto-Electronics Review. 2019, vol. 27, no. 2, pp. 174–193. doi: 10.1016/j.opelre.2019.04.004
12. Schneider H., Liu H. C. Quantum Well Infrared Photodetectors: Physics and Applications. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, 248 p. doi: 10.1007/978-3-540-36324-8

13. Bogoslovskaya L. S., Dudin A. L., Zubkov V. I. Influence of Barrier Width on QWIP Operating Voltage. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 72–80.
doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-72-80

14. Schneider H., Koidl P., Walther M., Fleißner J., Ziegler J. GaAs/AlGaAs Quantenfilm Photodetektoren für Kameras im 8...12µm-Bereich. *tm-Technisches Messen*. 1999, vol. 66, no. 9, pp. 344–349.

15. Billaha A., Das M. K. Influence of Doping on the Performance of GaAs/AlGaAs QWIP for Long Wavelength Applications. *Opto-Electronics Review*. 2016, vol. 24, no. 1, pp. 25–33.
doi: 10.1515/oere-2016-0006

16. Nutku F., Erol A., Gunes M., Buklu L. B., Ergun Y., Arikan M. C. I–V Characterization of a Quantum Well Infrared Photodetector with Stepped and Graded Barriers. *Superlattices and Microstructures*. 2012, vol. 52, no. 3, pp. 585–593.
doi: 10.1016/j.spmi.2012.06.010

17. Yang Y., Liu H. C., Shen W. Z., Li N., Lu W., Wasilewski Z. R. Optimal Doping Density for Quantum-Well Infrared Photodetector Performance. *IEEE J. of Quantum Electronics*. 2009, vol. 45, no. 6, pp. 623–628.
doi: 10.1109/JQE.2009.2013119

18. Dudin A. L., Katsavets N. I., Krasovitsky D. M., Filaretov A. G., Chaly V. P. Standardization of Manufacturing Technologies for Matrices for Cooled Thermal Imagers: "Hot" or "Cold"? *Electronics: Science, Technology, Business*. 2022, no. 2, pp. 114–119.
doi: 10.22184/1992-4178.2022.213.2.114.119

Information about the authors

Anatoliy L. Dudin, Specialist in Physics and Technology of Semiconductor Devices (1996, Saint Petersburg Electrotechnical University), Chief Technologist of JSC "Svetlana-Rost". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: microwave; technology of semiconductor devices; QWIP.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Vasily I. Zybkov, Dr Sci. (Phys. and Math.) (2008), Professor (2018) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor; nanoelectronics; admittance spectroscopy; diagnostics of nanoheterostructures; computer modeling.

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

E-mail: vzubkovspb@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6830-6899>

Lana S. Bogoslovskaya, Master in Nanotechnology and Microsystem Engineering (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer-technologist of JSC "Svetlana-Rost". End-to-end technologist in the QWIP direction. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: semiconductor chip manufacturing technology; QWIP.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: lana.stoliarowa@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-9538-1055>

Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений

А. А. Иванов¹, В. И. Марголин^{1✉}, А. В. Никифоров²,
Нгуен Вьет Ан¹, Г. В. Петрова¹, А. И. Протченко³, А. А. Рассадина¹,
В. А. Тупик¹, Н. Н. Шарова³, И. С. Шолина¹, А. В. Корбут²

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

²Открытое акционерное общество "Завод Магнетон", Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт "Феррит-Домен"»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ v.margolin@mail.ru

Аннотация

Введение. Обсуждаются вопросы, связанные с групповыми методами создания защитной маски на подложке в процессах высокоразрешающей проекционной рентгеновской литографии.

Цель работы. Исследование литографических характеристик рентгенорезистов, особенностей применения различных режимов.

Материалы и методы. Исследования проводились с помощью рентгеновского спектрометра-монокроматора РСМ-500. Коэффициенты поглощения измерялись на монохроматических рентгеновских линиях в диапазоне длин волн 5...50 Å. Толщина пленок контролировалась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Результаты. Получены зависимости коэффициентов поглощения резистов в области мягкого рентгеновского излучения (5...50 Å). При достижении определенной длины волны наблюдается резкий скачок коэффициента поглощения. Обнаружены скачки поглощения при длинах волн 23 и 43 Å. Это связано с тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для ионизации электронов с определенного энергетического уровня атомов поглощающего вещества. Показано, что коэффициент поглощения рентгеновских лучей возрастает с увеличением их длины волны. Между скачками поглощения в некоторых диапазонах коэффициент может быть аппроксимирован гладкой функцией. Предложены аналитические аппроксимации полученных зависимостей в виде степенных функций, проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями, показавшее удовлетворительное согласие.

Заключение. Описана и представлена методика измерения коэффициентов поглощения рентгенорезистов. Экспериментально получены данные по поглощению в различных резистах рентгеновского излучения с различными волновыми характеристиками.

Ключевые слова: рентгеновская литография, рентгенорезисты, контрастно-чувствительные характеристики

Для цитирования: Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений / А. А. Иванов, В. И. Марголин, А. В. Никифоров, Нгуен Вьет Ан, Г. В. Петрова, А. И. Протченко, А. А. Рассадина, В. А. Тупик, Н. Н. Шарова, И. С. Шолина, А. В. Корбут // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 44–56.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-44-56

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.04.2026; принята к публикации после рецензирования 18.05.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation

Arkady A. Ivanov¹, Vladimir I. Margolin^{1✉},
Andrey V. Nikiforov², Nguyen Viet An¹, Galina V. Petrova¹,
Artemy I. Protchenko³, Anna A. Rassadina¹, Viktor A. Tupik¹,
Natalia N. Sharova², Irina S. Sholina¹, Andrey V. Korbut²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Open Joint Stock Company "Plant-Magneton", St Petersburg, Russia

³ Joint Stock Company "Research Institute "Ferrite Domain", St Petersburg, Russia

✉v.margolin@mail.ru

Abstract

Introduction. Issues associated with group methods for fabricating protective masks on substrates in high-resolution projection X-ray lithography are discussed.

Aim. To study the lithographic characteristics of X-ray resists and the specific features of their application under various operating modes.

Materials and methods. Studies were conducted using an RSM-500 X-ray spectrometer-monochromator. Absorption coefficient measurements were performed on monochromatic X-ray lines in the wavelength range of 5...50 Å. Film thickness was monitored using an MII-4 interference microscope.

Results. Spectral dependencies of the absorption coefficients in the soft X-ray range (5...50 Å) were obtained. At certain wavelengths, a sharp increase in the absorption coefficient was observed. Absorption jumps were detected at wavelengths of 23 and 43 Å. This phenomenon is associated with the fact that the X-ray photon energy becomes sufficient to ionize electrons from specific atomic energy levels of the absorbing material. It was shown that the X-ray absorption coefficient increases with increasing wavelength. Between the absorption jumps, the coefficient can be approximated by a smooth function over certain wavelength intervals. Analytical approximations of the obtained dependencies in the form of power-law functions were proposed. A comparison of the experimental data with the calculated values showed satisfactory agreement.

Conclusion. A technique for measuring the spectral dependences of X-ray resist absorption coefficients was developed. Soft X-ray absorption coefficients were experimentally obtained.

Keywords: X-ray lithography, X-ray resists, contrast-sensitive characteristics

For citation: Ivanov A. A., Margolin V. I., Nikiforov A. V., Nguyen Viet An, Petrova G. V., Protchenko A. I., Rassadina A. A., Tupik V. A., Sharova N. N., Sholina I. S., Korbut A. V. X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 44–56.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-44-56

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

Submitted 16.04.2026; accepted 18.05.2026; published online 29.06.2026

Введение. Несмотря на лабораторные и академические исследования в области монокристаллической и мономолекулярной сборки и применение на практике как сфокусированных, так и расфокусированных электронных пучков для генерации изображения (рисунка, маски) на поверхности подложки, покрытой слоем соответствующего резиста, применение мягкого и жесткого рентгеновского излучения (РИ) остается самым продуктивным и востребованным технологическим процессом [1–4]. Применение коротковолнового электромагнитного излуче-

ния, такого, как глубокий вакуумный ультрафиолет (ГУФ), натывается на так называемую коротковолновую границу (при длине волны около 100 нм), препятствующую пропусканию света любыми материалами, что исключает применение обычных оптических систем. Поэтому усилия разработчиков литографического оборудования, работающего в области ГУФ, сконцентрировались на реализации отражающей зеркальной оптики, использующей очень сложные системы зеркал. Системы вакуумного ультрафиолета для обеспечения в будущем

Рентгеновская литография для реализации наноразмерных изображений

X-Ray Lithography for Nanoscale Image Formation

пространственного разрешения около 20 нм и ниже вынуждены использовать зеркала с многослойной структурой до 100 слоев различных материалов с толщиной каждого покрытия в доли микрометров и в десятки нанометров. Системы обычно работают в диапазоне излучения 13.5 нм и связаны с проблемами наличия высокоотражающих многослойных покрытий.

В качестве рабочего обычно используется излучение с длиной волны 13.5 нм, а в качестве отражающих материалов – системы на основе La/B₄C, La/B₉C [5, 6], WSc, WSi, WC [7–9] и другие, обеспечивающие отражение до 90 % падающего излучения (если верить рекламным сообщениям различных фирм). Однако коэффициент отражения 70 % зафиксирован реально, что тоже очень хорошо.

Аналогичные системы используются и для реализации процесса рентгеновской литографии, но если с источниками глубокого ультрафиолета особых трудностей и проблем практически нет, то с рентгеновским излучением все сложнее. Наиболее распространенной аппаратурой являются источники рентгеновского излучения, использующие водоохлаждаемый анод и остросфокусированный пучок электронов. Помимо того, что особо острая фокусировка электронного пучка – серьезная проблема, такая система (и это главное) имеет радиальную симметрию (точечный источник и веером расходящееся рентгеновское излучение).

Совершенно очевидно, что идеальным источником рентгеновского излучения для целей литографии является синхротронное излучение с легко перестраиваемой длиной волны и практически абсолютно параллельное. Таких синхротронов в РФ очень мало.

Применение проекционной электронной литографии ограничивается сложностью изготовления электронных шаблонов, сложностью их эксплуатации и физическими ограничениями, налагаемыми на технологические процессы, связанные с рассеянием и отражением электронов от слоя резиста и нижележащей подложки. Это приводит к трансформации монокинетического параллельного электронного пучка в обратнорассеянный в слой резиста поток электронов с разными углами рассеяния и разной энергией. Применение остросфокуси-

рованного электронного пучка позволяет достичь точечного разрешения около 20 Å (1 Å = 10⁻¹⁰ м). Этого вполне достаточно для формирования как электроношаблонов, так и рентгеношаблонов, но не хватает для массового производства чипов, так как время реализации изображения на поверхности резиста для одного чипа составляет не минуты, а в лучшем случае многие часы [10].

Поскольку в воздухе коротковолновое излучение сильно рассеивается и поглощается, то все эти процессы необходимо производить в вакууме, причем, чем выше вакуум, тем лучше. Применение в качестве источника рентгеновского или ЭУФ-излучения лазерной плазмы, генерируемой Nd:YAG-лазером с длиной волны 1063 нм, создает излучение с широкой полосой предельного ультрафиолета с длиной волны ~10...25 нм. Однако лазерная плазма является точечным источником с радиальной симметрией и массой вытекающих из этого факта проблем. Следует отметить появление интереса к рентгенолитографии со стороны промышленности [11]. В Нижнем Новгороде регулярно проходит симпозиум "Нанозифика и нанозлектроника", где озвучиваются разные положительные тенденции. В частности, сообщается о возглавляемой Николаем Ивановичем Чхало команде исследователей с имеющимися научно-техническими заделами, которая способна решить проблему создания рентгеновского литографа. В Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН выдвинуты предположения о развитии технологии рентгеновской литографии с использованием новой установки СКИФ в Академгородке [11].

Основные литографические характеристики резистных композиций. Помимо чисто технических трудностей имеются проблемы, связанные с использованием резистов и резистных композиций. Исторически сложилось так, что в качестве защитной маски (резиста) использовались такие органические композиции, как полиметилметакрилат (ПММА) и позитивные резисты типа ЭРП-7, ЭРП-40 и ЭРП-51. Любые резисты характеризуются основными литографическими параметрами – пороговой дозой облучения, критической дозой облучения и контрастночувствительной характеристикой [12–14]. Государственный стандарт Российской Федерации

определяет все необходимые параметры резистов, но, к сожалению, не предусматривает никакого наказания за его несоблюдение [15].

Пороговая доза означает количество электромагнитного излучения (в случае электронорезистов – удельный заряд на поверхности пленки), приходящегося на поверхность нанесенной пленки резиста. В классическом понимании это должна быть доза энергии, выделяющаяся в единице объема резиста и обеспечивающая начало полимеризации (или деструкции) резистивной пленки D_0 . Критическая доза соответствует дозе, при которой происходит полная полимеризация (или деструкция) резиста на всю его толщину ($D_{кр}$). Обратный логарифм их отношений определяет так называемый контраст, а зависимость контраста от дозы падающего излучения и есть контрастно-чувствительная характеристика (КЧХ) – $\lg[D_0/D_{кр}]^{-1}$. Стандартные КЧХ для негативного и позитивного резистов приведены на рис. 1.

По энергетическим характеристикам, выраженным в электрон-вольтах на сантиметр в кубе, контрасты электронных и рентгеновских резистов близки по значению, что позволяет коррелировать ранее полученные данные по электронорезистам с данными по рентгенорезистам.

Еще одним узким местом рентгеновской литографии являются особенности рентгеновского излучения. Дело в том, что мягкое рентгеновское излучение целиком поглощается практически любым материалом, а жесткое практически не поглощается, на чем основано применение его в медицине. Поэтому надо

осмысленно подходить к выбору типа излучения и, соответственно, генерирующей его аппаратуры. Жесткое рентгеновское излучение почти не поглощается различными грязными примесями с малым атомным номером, что полезно при эксплуатации рентгеношаблонов и использовании толстых пленок резиста и позволяет формировать в толстом резисте почти вертикальные стенки [13, 16, 17].

Для генерации рентгеновского излучения обычно используют точечный источник излучения с радиальной симметрией, вследствие чего при использовании как мягкого рентгеновского излучения (0.4...10 кэВ), так и жесткого (80...100 кэВ) начинает работать метод теневой проекции (рис. 2).

С точки зрения прецизионности процесса литографии на первом месте стоит синхротронное излучение, поскольку оно обеспечивает использование и регулирование рентгеновского излучения в очень широком диапазоне длин волн и яв-

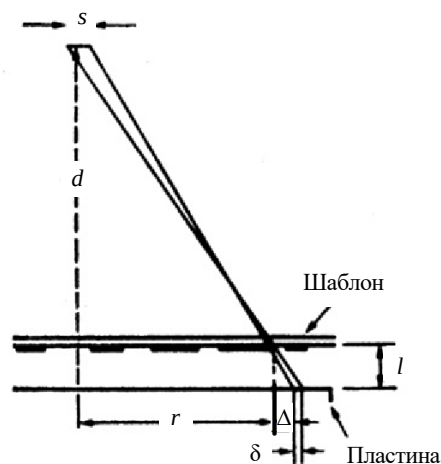


Рис. 2. Эффект полутени в рентгеновской литографии

Fig. 2. Penumbra effect observed in X-ray lithography

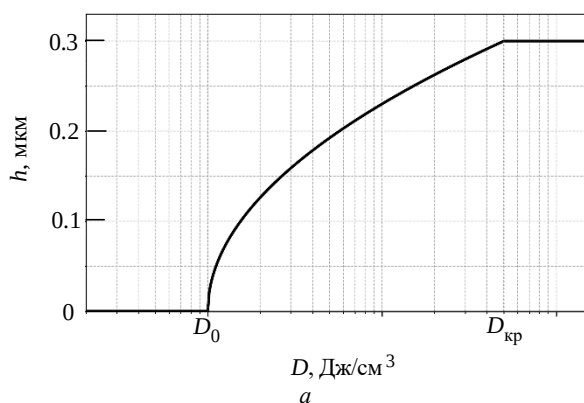
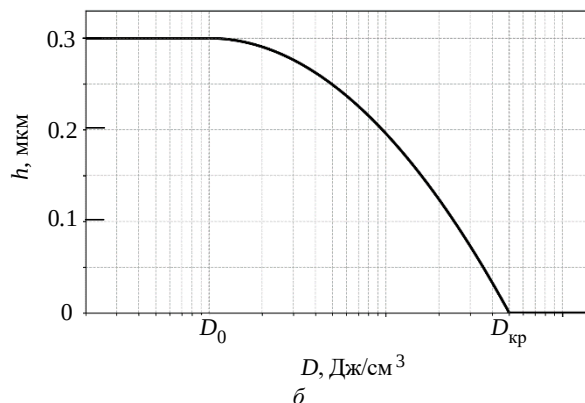


Рис. 1. КЧХ: а – негативного резиста; б – позитивного резиста

Fig. 1. Contrast curve: а – for a negative resist; б – for a positive resist



ляется практически единственным способом получения параллельного потока излучения, исключаяющего эффекты тени и полутени.

Ведущей организацией в области разработки технологий применения синхротронного излучения является Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения, образованный на базе Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск), поскольку располагает необходимым оборудованием и высококвалифицированными кадрами для его обслуживания [18].

К сожалению, чем выше чувствительность резиста, тем хуже реализованный с его помощью контраст. Для использованных авторами статьи позитивных резистов типа ЭРП-7 и ЭРП-40 чувствительность составляет около 400 Дж/см^3 , а контраст примерно 2.5. Для негативного резиста на основе полибутадиена чувствительность 20 Дж/см^3 , а контраст примерно 0.6. Более перспективными представляются резисты на основе ПММА. Для простоты экспериментов часто используются дозовые характеристики – интенсивность излучения, падающего на поверхность резиста, – а не классические (в электрон-вольтах на сантиметр в кубе).

Исследование спектральных зависимостей и коэффициентов поглощения рентгеновского излучения. Литературные данные, которые должны исчерпывающим образом характеризовать исследуемый резист в соответствии с ГОСТ Р 52250–2004 [15] по важным параметрам рентгенорезистов и используемых различных полимерных композиций, к сожалению, носят отрывочный и несистемный характер. К этому добавляется необходимость корректировки полученных данных с учетом особенностей используемой аппаратуры.

В связи с этим представляется необходимой разработка методики и проведение измерений соответствующих параметров. Логично начать эту работу с исследования спектрального хода коэффициента поглощения, который определяет способность резистного материала запасать энергию в процессе экспозиции, а следовательно, и чувствительность резиста к рентгеновскому излучению. Создание одновременно высокочувстви-

тельных и высококонтрастных рентгенорезистов остается пока задачей далекого будущего, поэтому на практике приходится использовать существующие материалы. В связи с этим в описываемой работе решались следующие задачи:

1) разработка методики измерения коэффициентов поглощения полимерных пленок в области мягкого рентгеновского излучения, используя стандартную рентгеноспектральную аппаратуру;

2) получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов: ПММА, ЭРП-7 и ЭРП-40, пригодных для использования в качестве рентгенорезистов, но с некоторыми добавками.

В работе использовался рентгеновский спектрометр-монокроматор РСМ-500 [19], позволяющий устанавливать дифракционные решетки различных радиусов кривизны для широкой области спектра ($5 \dots 500 \text{ \AA}$).

Способ фильтрации рабочего участка спектра от наложения коротковолнового излучения в высших порядках дифракции основан на использовании явления полного отражения рентгеновских лучей от поверхности вещества [1]. Значение *критической длины волны* для данной среды зависит лишь от угла падения излучения на отражающую поверхность. Критическим длинам волн в области мягкого рентгеновского излучения соответствуют углы $2 \dots 20^\circ$, конструктивно удобные для эксперимента [18].

Экспериментальные исследования проводились в группе профессора ЛЭТИ В. А. Тупика и являются продолжением его ранних работ [16]. Поскольку значения коэффициентов поглощения резистов измерялись на отдельных монокроматических линиях, наложение на рабочий спектральный интервал излучения в высших порядках дифракции не приводило к серьезным затруднениям. Поэтому было использовано одно фильтрующее зеркало ($R = 4000 \text{ нм}$), покрытое золотом и установленное под углом скольжения $1^\circ 30'$ к падающему излучению. В качестве детектора мягкого рентгеновского излучения использовался пропорциональный счетчик, позволяющий регистрировать излучение без заметных просчетов

в широком диапазоне интенсивностей.

Окна счетчиков изготавливались из тонких пленок нитроцеллюлозы и формвара. Если монохроматическая линия достаточно узкая и контрастная, то разность интенсивностей линии и среднего фона с высокой точностью будет представлять интенсивность монохроматического излучения. Коэффициенты поглощения, определенные по интенсивностям (за вычетом фона) падающего и проходящего излучения, соответствуют монохроматическому излучению [16, 17, 20].

Рис. 3 и 4 иллюстрируют использованную методику определения коэффициентов поглощения резистов в области мягкого рентгеновского излучения. На этих рисунках показаны усредненные автоматические записи двух различных по контрастности рентгеновских линий – CuL_α (13.3 Å) и CuL_α (36.3 Å) – без поглотителя (а) и с поглотителем – тонкой пленкой полимерного резиста (б). Уровень фона под максимумом линии определялся посредством линейной интерполяции спектрального хода фона между точками спектра, достаточно удаленными от максимума линии [18]. По результатам измерений определялась величина

$$\mu x = \ln \left[(J_0 - J_{\phi 0}) / (J - J_\phi) \right],$$

где μ – линейный коэффициент поглощения; x – толщина поглотителя; J_0 и $J_{\phi 0}$ – интенсив-

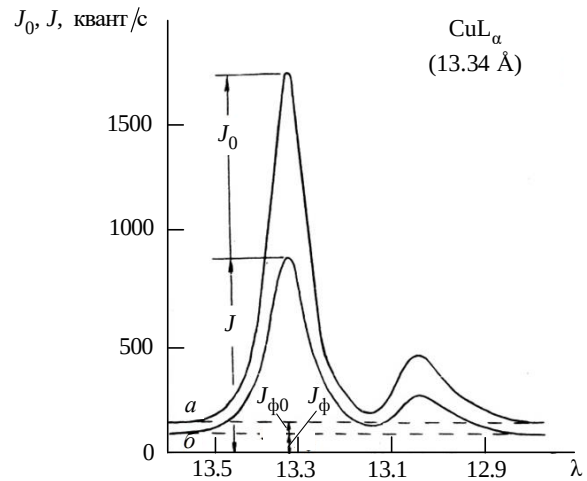


Рис. 3. Иллюстрация методики получения коэффициента поглощения резиста при использовании контрастной рентгеновской линии CuL_α : а – без поглотителя; б – с поглотителем (тонкой пленкой полимерного резиста)

Fig. 3. Illustration of the method for determining the absorption coefficient of the resist using the CuL_α characteristic X-ray line: а – without absorber; б – with absorber (thin polymer resist film)

ность в максимуме и уровень фона монохроматической линии излучения, падающего на поглотитель; J и J_ϕ – аналогичные параметры излучения, проходящего через поглотитель.

Следующий этап в процессе нахождения линейного коэффициента поглощения μ – измерение толщины поглотителя. Эта характеристика поли-

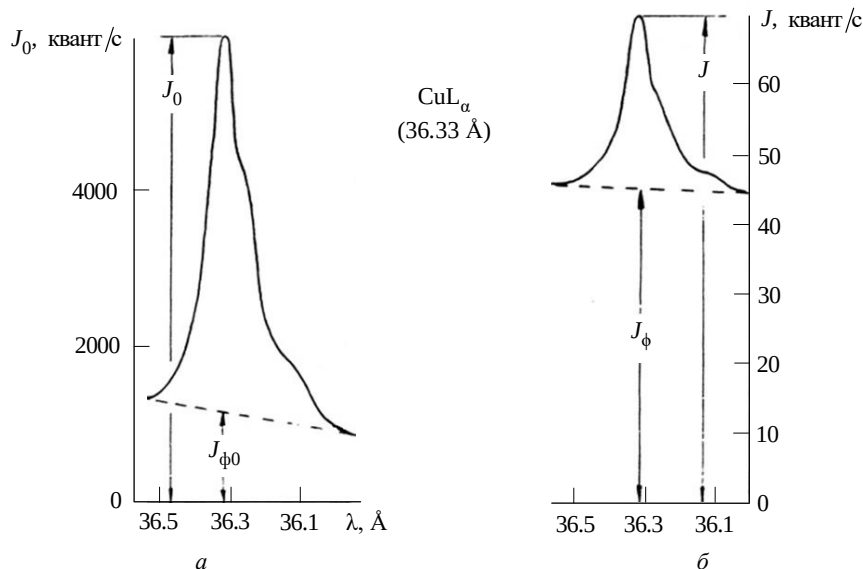


Рис. 4. Иллюстрация методики получения коэффициента поглощения резиста при использовании малоконтрастной рентгеновской линии CuL_α : а – без поглотителя; б – с поглотителем (тонкой пленкой полимерного резиста)

Fig. 4. Illustration of the method for determining the absorption coefficient of the resist using the low-contrast CuL_α characteristic X-ray line: а – without absorber; б – with absorber (thin polymer resist film)

мерной пленки определялась с помощью оптического интерференционного микроскопа МИИ-4.

Пленки на основе резистов ЭРП-7 и ПММА получались либо окунанием стеклянных подложек в раствор, либо методом центрифугирования.

Обсуждение результатов. На рис. 5 и 6 в логарифмическом масштабе представлены экспериментально полученные спектральные зависимости коэффициентов поглощения μ для двух резистов: на основе ПММА и на основе ЭРП-7. Результаты измерений коэффициентов поглощения на рентгеновских линиях указаны на рисунках темными кружками и приведены в табл. 1 и 2.

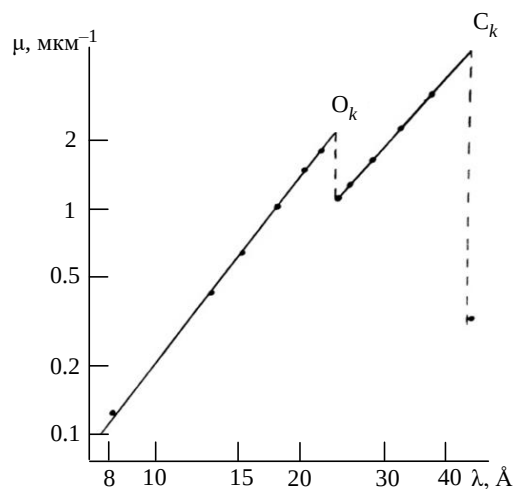


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента поглощения μ резиста ПММА в области мягкого рентгеновского излучения

Fig. 5. Spectral dependence of the absorption coefficient μ of PMMA resist in the soft X-ray region

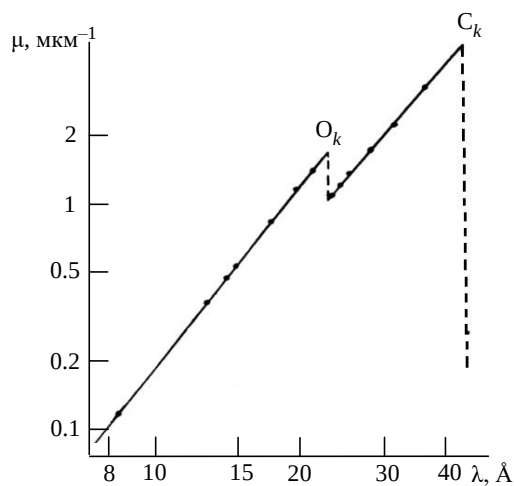


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента поглощения μ резиста ЭРП-7 в области мягкого рентгеновского излучения

Fig. 6. Spectral dependence of the absorption coefficient μ of ERP-7 resist in the soft X-ray region

Прецизионность полученных экспериментальных результатов – не хуже 10 %. Для обеих зависимостей $\mu(\lambda)$ характерно наличие трех спектральных областей; наблюдаемые скачки коэффициента поглощения соответствуют k -краям атомов кислорода и углерода.

Результаты для $\lambda < 23 \text{ Å}$ и $23 < \lambda < 43 \text{ Å}$ хорошо укладываются в логарифмическом масштабе на отрезки прямых; соответственно, зависимость $\mu(\lambda)$ можно представить в следующем виде:

для ПММА:

$$\begin{aligned} \mu &= 4.76 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.65} & \lambda < 23 \text{ Å} \\ \mu &= 7.43 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.3} & 23 < \lambda < 43 \text{ Å}; \end{aligned}$$

для ЭРП-7:

$$\begin{aligned} \mu &= 4.71 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.6} & \lambda < 23 \text{ Å} \\ \mu &= 3.94 \cdot 10^{-4} \lambda^{2.5} & 23 < \lambda < 43 \text{ Å}. \end{aligned}$$

Сравнив полученные результаты, можно отметить их сходство, так как использовались органические полимерные композиции со сходными физическими характеристиками; расхождения же зависят от интенсивности излучения.

Оптимальная доза рентгеновского облучения для резиста ПММА и композиций на его основе примерно 500 Дж/см^3 . Для композиций на основе резиста ЭРП-7 в настоящее время имеются лишь отрывочные сведения, поэтому необходимо проводить экспериментальные исследования для конкретной аппаратуры и состава композиции. В связи с этим невозможно с определенностью решить, какому из исследованных полимеров следует отдать предпочтение при использовании в качестве рентгенорезиста.

В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные о коэффициентах поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения, а также об их точном химическом составе. Поэтому в табл. 3 результаты, полученные авторами статьи для ПММА при трех длинах волн, сравниваются с оценками из [10, 15] и др. В области мягкого рентгеновского излучения наблюдается хорошее согласие экспериментальных данных с рассчитанными значениями коэффициентов поглощения.

Заключение. Приведен обзор современного состояния научно-исследовательских работ по применению рентгеновской литографии в микроэлектронике. Отмечается, что достигну-

Табл. 1. Коэффициенты поглощения резиста на основе ПММА в области мягкого рентгеновского излучения

Tab. 1. Absorption coefficients of the PMMA-based resist in the soft X-ray region

Линия	AlK α	CdL α	CdL α_1	FeL α	FeL α_1	CrL α	OK α	CrL α_1	TiL α	TiL α_1	CaL α	CK α
Длина волны, Å	8.34	13.3	15.8	17.6	20.15	21.6	23.6	24.8	27.4	31.4	36.3	44.7
Коэффициент поглощения (μ), мкм $^{-1}$	0.11	0.40	0.60	0.90	1.30	1.60	1.08	1.19	1.50	2.20	2.90	0.40

Табл. 2. Коэффициенты поглощения резиста на основе ЭРП-7 в области мягкого рентгеновского излучения

Tab. 2. Absorption coefficients of the ERP-7-based resist in the soft X-ray region

Линия	AlK α	CaL α	NiL α	CaL α_1	FeL α	FeL α_1	CrL α	OK α	VaL α	CrL α_1	VaL α_1
Длина волны, Å	8.34	13.3	14.6	15.8	17.6	20.15	21.6	23.6	24.5	24.8	27.8
Коэффициент поглощения (μ), мкм $^{-1}$	0.11	0.41	0.47	0.50	0.72	1.13	1.44	1.03	1.16	1.19	1.50

Табл. 3. Сравнение экспериментальных результатов данной работы с другими

Tab. 3. Comparison of the obtained experimental results with others those reported in literature

Линия	Длина волны, Å	Коэффициент поглощения (μ), мкм $^{-1}$	
		Данная работа	Литературные данные
AlK α	8.34	0.13	0.11
CuL α	13.3	0.45	0.40
CrL α	21.6	1.68	1.58

тый в настоящее время уровень рентгенолитографической технологии позволяет изготавливать в лабораторных и промышленных условиях микроэлектронные устройства с субмикронным разрешением. Указываются некоторые

возможные направления научно-исследовательской работы по развитию рентгенолитографической технологии.

Разработана методика получения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения рентгенорезистов с использованием стандартной рентгеноспектральной аппаратуры.

В области длин волн 5...50 Å измерены коэффициенты поглощения резистов на основе композиций ПММА и ЭРП-7. Даны аналитические представления полученных результатов.

Отмечается необходимость усиления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области микро- и нанолитографии, включая рентгеновскую литографию.

Авторский вклад

Иванов Аркадий Анатольевич – формулировка и постановка задачи в области групповых методов создания защитной маски на подложке в процессах высокоразрешающей проекционной рентгеновской литографии; обсуждение результатов экспериментов.

Марголин Владимир Игоревич – исследование литографических характеристик рентгенорезистов.

Никифоров Андрей Викторович – исследование спектральных зависимостей и коэффициентов поглощения рентгенорезистов при использовании мягкого рентгеновского излучения.

Нгуен Вьет Ан – анализ литературных данных в области методики получения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения рентгенорезистов с использованием стандартной рентгеноспектральной аппаратуры; оформление графической части статьи.

Петрова Галина Васильевна – анализ литературных источников об экспериментальных исследованиях коэффициентов поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения.

Протченко Артемий Игоревич – изготовление окон счетчика; проведение эксперимента по измерению интенсивности монохроматического излучения.

Рассади́на Анна Александровна – участие в изготовлении окон счетчика и проведение эксперимента по измерению интенсивности монохроматического излучения.

Тупик Виктор Анатольевич – обсуждение вопросов фильтрации рабочего участка спектра от наложения коротковолнового излучения в высших порядках.

Шарова Наталья Николаевна – получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов.

Шолина Ирина Серафимовна – анализ литературных источников об экспериментальных исследованиях коэффициентов поглощения рентгеночувствительных материалов в области мягкого рентгеновского излучения.

Корбут Андрей Владимирович – анализ литературных источников о химическом составе фоторезистов и размере дозы рентгеновского облучения.

Author's contribution

Arkady A. Ivanov, formulation related to group methods of creating a protective mask on a substrate in the processes of high-resolution projection X-ray lithography; discussion of experimental results.

Vladimir I. Margolin, investigation of lithographic characteristics of X-ray resists.

Andrey V. Nikiforov, investigation of spectral dependences and absorption coefficients of X-ray resists using soft X-ray radiation.

Nguyen Viet An, analysis of literature data in the field of methods for obtaining spectral dependences of absorption coefficients of X-ray resists using standard X-ray spectral equipment; formalization of the graphic part of the article.

Galina V. Petrova, analysis of literature sources on experimental studies of absorption coefficients of rent-sensitive materials in the field of soft X-ray radiation.

Artemy I. Protchenko, manufacturing of counter windows; conducting an experiment to measure the intensity of monochromatic radiation.

Anna A. Rassadina, participation in the manufacture of counter windows and conducting an experiment to measure the intensity of monochromatic radiation.

Viktor A. Tupik, discussion of the issues of filtering the working part of the spectrum from superposition of shortwave radiation in higher orders.

Natalia N. Sharova, получение в области мягкого рентгеновского излучения спектральных зависимостей коэффициентов поглощения электронных полимерных резистов.

Irina S. Sholina, analysis of literature sources on experimental studies of absorption coefficients of rent-sensitive materials in the field of soft X-ray radiation.

Andrey V. Korbut, analysis of literature sources on the chemical composition of photoresists and the dose of X-ray irradiation.

Список литературы

1. Кузьмин С., Матвеев В. Интерференционная рентгенолитография для упорядоченных наноструктур // Электроника: НТБ. 2014. Спец. вып. 00137. С. 47–56.

2. Павлова А. П., Клементьева Д. О. Рентгенолитография как современный метод нанолитографии // Материалы Междунар. науч.-практ. форума студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГИКиТ, 2021. С. 160–170.

3. Артюков И. А. Оптическая и рентгеновская микролитография на рубеже веков // Квантовая электроника. 2022. Т. 52, № 12. С. 1094–1101.

4. Проблемы и перспективы развития рентгеновской литографии / Н. И. Чхало, С. В. Голубев, З. Ф. Красильник, В. Н. Полковников, М. В. Стародубцев // ЛП Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу / АО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН". М., 2025. С. 45.
doi: 10.34854/ISPAF.52.2025.1.1.007

5. Многослойные рентгеновские зеркала на основе $\text{La/B}_4\text{C}$ и $\text{La/B}_5\text{C}$ / С. С. Андреев, М. М. Барышева, Н. И. Чхало, С. А. Гусев, А. Е. Пестов, В. Н. Полковников, Д. Н. Рогачев, Н. Н. Салащенко, Ю. А. Вайнер, С. Ю. Зуев // Журн. техн. физики. 2010. Т. 80, вып. 8. С. 93–100.

6. Лаборатория рентгеновской оптики Физического института П. Н. Лебедева РАН. Разработки. Многослойные рентгеновские зеркала. URL: <https://sites.lebedev.ru/ru/LRO/663.html> (дата обращения: 08.04.2026).

7. Многопучковая рентгенолитография для формирования глубоких регулярных микроструктур / Б. Г. Гольденберг, А. Г. Лемзяков, А. Г. Зелинский, В. П. Назьмов, В. Ф. Пиндюрин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные ис-

следования. 2016. № 1. С. 64–67.
doi: 10.7868/S0207352816010133

8. Аристов В. В., Шабельников Л. Г. Современные достижения рентгеновской оптики преломления // УФН. 2008. Т. 178, № 1. С. 61–83.
doi: 10.3367/UFNr.0178.200801c.0061

9. Серов И. Н., Жабров В. А., Марголин В. И. Проблемы нанотехнологии в современном материаловедении // Физика и химия стекла. 2003. Т. 29, № 2. С. 241–255.

10. Скупов А. Основные свойства и характеристики современных резистов для электронной литографии // Вектор высоких технологий. 2016. № 8 (29). С. 26–31.

11. Способ изготовления кремниевых рентгеношаблонов с использованием плазмохимического травления / А. Н. Генцелев, Ф. Н. Дульцев, Б. Г. Гольденберг, К. Э. Купер // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 8. С. 108–112.
doi: 10.31857/S1028096020080087

12. Генцелев А. Н., Варанд А. В. Определение технологического окна для высокоаспектной рентгенолитографии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 12. С. 27–34.
doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-27-34

13. Работы с использованием синхротронного излучения в Новосибирском Научном центре / К. В. Золотарев, А. И. Анчаров, З. С. Винокуров, Б. Г. Гольденберг, Ф. А. Дарьин, В. В. Кривенцов, Г. Н. Кулипанов, К. Э. Купер, А. А. Легкодымов, Г. А. Любас, А. Д. Николенко, К. А. Тен, Б. П. Толочко, М. Р. Шарафутдинов, А. Н. Шмаков, Е. Б. Левичев, П. А. Пиминов, А. Н. Журавлев // Изв. РАН. Сер. физическая. 2023. Т. 87, № 5. С. 614–626.
doi: 10.31857/S0367676522701095

14. Марголин В. И., Шишов С. Е. Перспективы и проблемы нанотехнологий // О национальной доктрине развития в Российской Федерации нанотехнологий: аналитический сб. / Комитет Совета Федерации по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии. М., 2006. С. 54–63.

15. ГОСТ Р 52250–2004. Материалы электронной техники. Резисты для литографических процессов. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004.

16. Марголин В. И., Тупик В. А. Исследование литографических характеристик электроно- и рентгенорезистов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 1998. Вып. 1. С. 82–85.

17. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.

18. Калинин Б. Д., Плотников Р. И., Речинский А. А. Применение рентгеновской спектрометрии для идентификации органических соединений и материалов // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15, № 1. С. 56–63.

19. Назьмов В. П. Глубокая 3D-рентгенолитография на основе высококонтрастного рентгенорезиста // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45, вып. 18. С. 3–5. doi: 10.1134/S1063785019090256

20. Особенности формирования изображения в составных преломляющих линзах в мягком рентгеновском диапазоне длин волн / П. Ю. Глаголев, Г. Д. Демин, В. И. Корнеев, Н. А. Дюжев // Журн. техн. физики. 2024. Т. 94, вып. 7. С. 1182–1195. doi: 10.61011/JTF.2024.07.58355.177-24

Информация об авторах

Иванов Аркадий Анатольевич – доктор технических наук (2018), профессор (2020) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ; проектирование радиоэлектронной аппаратуры и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aai2@yandex.ru

Марголин Владимир Игоревич – доктор технических наук (1998), профессор (1999) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнология и физикохимия органических и неорганических композиционных материалов и фракталы. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: v.margolin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6322-0727>

Никифоров Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук (1987), ведущий специалист по инновационной деятельности ОАО "Завод Магнетон" (2017). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – физика магнитных явлений в твердых телах. Адрес: ОАО "Завод Магнетон", ул. Курчатова, д. 9, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: nikiforovav@magneton.ru

Нгуен Вьет Ан – специалист по специальности "Радиоэлектронные системы" (2016, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны), аспирант кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – разработка ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона; радиолокация, наноматериалы; искусственный интеллект. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: kphivan95@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-8660-3050>

Петрова Галина Васильевна – кандидат технических наук (1989), доцент (1993) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – технология приборостроения; автоматизация проектирования технологических процессов; экспертные системы, а также разработка и исследование резистивных материалов для микро- и нанолитографии. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: pgv50@mail.ru

Протченко Артемий Игоревич – инженер по специальности "Материаловедение и технологии новых материалов" (1998, Ленинградский горный институт), заместитель генерального директора по государственному оборонному заказу АО "НИИ Феррит-Домен". Автор ряда закрытых публикаций по синтезу материалов для применения в СВЧ-устройствах высокого уровня мощности. Сфера научных интересов – разработка ферритовых и диэлектрических материалов для пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона. Адрес: АО "НИИ Феррит-Домен", ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
e-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Рассадина Анна Александровна – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 48 научных работ. Сфера научных интересов – разработка сенсорных систем и материаловедение для биомедицинской диагностики и нанотехнологий. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: a.a.rassadina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9906-7034>

Тупик Виктор Анатольевич – доктор технических наук (2011), профессор (2014) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанотехнологии; технологии сборки радиоэлектронных устройств; энерго- и ресурсосберегающие технологии; организация технологических процессов в радиоэлектронике. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vatupik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3760-3468>

Шарова Наталья Николаевна – инженер по специальности "Прикладная математика и информатика" (1997, Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля), заместитель генерального директора АО "НИИ Феррит-Домен". Сфера научных интересов – разработка математических моделей для ЭКБ. Адрес: АО "НИИ Феррит-Домен", ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
e-mail: n.n.sharova@domen.ru

Шолина Ирина Серафимовна – инженер конструктор-технолог радиоаппаратуры (1972, Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) (ЛЭТИ)), старший преподаватель, заместитель заведующего кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – информационные технологии, физико-технологические основы проектирования интегральных микросхем. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: issholina@etu.ru

Корбут Андрей Владимирович – магистр по материаловедению и технологии материалов (2023, СПбГТИ), руководитель сектора гальванических покрытий, ОАО "Завод Магнетон". Аспирант кафедры химической нанотехнологии и материалов электронной техники Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – гальванические покрытия; химическая нанотехнология; материалы электронной техники. Адрес: ОАО "Завод Магнетон", ул. Курчатова, д. 9, Санкт-Петербург, 194223, Россия
E-mail: andreykorbut93@yandex.ru.

References

1. Kuzmin S., Matveev V. X-Ray Interference Lithography for Forming Ordered Nanostructures. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2014, iss. 137, pp. 47–56. (In Russ.)
2. Pavlova A. P., Klimenteva D. O. *Rentgenolitografiya kak sovremennyy metod nanolitografii* [X-Ray Lithography as a Modern Nanolithography Method]. Proc. of the Intern. Scientific and Practical Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists: in 3 Pts. Pt 1. St Petersburg, *izd-vo SPbGKI*, 2021, pp. 160–170. (In Russ.)
3. Artyukov I. A. Optical and X-Ray Microlithography at the Turn of the Century. *Quantum Electronics*. 2022, vol. 52, no. 12, pp. 1094–1101. (In Russ.)
4. Chkhalo N. I., Golubev S. V., Krasil'nik Z. F., Polkovnikov V. N., Starodubtsev M. V. *Problemy i perspektivy razvitiya rentgenovskoy litografii* [Problems and Prospects of X-Ray Lithography]. LII Intern. Conf. in Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion. Moscow, JSC STC "PLASMAIOFAN", 2025, p. 45. (In Russ.)
doi: 10.34854/ICPAF.52.2025.1.1.007
5. Andreev S. S., Barysheva M. M., Chkhalo N. I., Gusev S. A., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Rogachev D. N., Salashchenko N. N., Vainer Y. A., Zuev S. Y. Multilayer X-Ray Mirrors Based ON LA/B₄C and LA/B₉C. *Technical Physics*. 2010, vol. 55, iss. 8, pp. 1168–1174.
6. X-ray Optics Laboratory. Multilayer X-Ray Mirrors. Available at: <https://sites.lebedev.ru/ru/LRO/663.html> (accessed: 08.04.2026).
7. Goldenberg B. G., Lemzyakov A. G., Nazmov V. P., Pindyurin V. F., Zelinsky A. G. Multibeam X-Ray Lithography to Form Deep Regular Microstructures. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016, vol. 10, no. 1, pp. 92–95.
doi: 10.7868/S0207352816010133
8. Aristov V. V., Shabelnikov L. G. Recent Advances in X-Ray Refractive Optics. *Advances in Physical Sciences*. 2008, vol. 51, pp. 57–77.
doi: 10.1070/PU2008v051n01ABEH006431

9. Serov I. N., Zhabrev V. A., Margolin V. I. Problems of Nanotechnology in Modern Materials Science. *Fizika i khimiya stekla*. 2003, vol. 29, no. 2, pp. 242–256. (In Russ.)

10. Skupov A. Basic Properties and Characteristics of Modern Resists for Electron Lithography. *Vektor vysokikh tekhnologiy*. 2016, no. 8 (29), pp. 26–31. (In Russ.)

11. Gentshev A. N., Dultsev F. N., Goldenberg B. G., Kuper K. E. Method for Manufacturing Silicon X-Ray Masks Via Plasma Chemical Etching. *J. of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 862–865. doi: 10.1134/s1027451020040266

12. Gentshev A. N., Varand A. V. The Technological Window Determining for High-Aspect X-Ray Lithography. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2024, vol. 90, no. 12, pp. 27–34. (In Russ.) doi: 10.26896/1028-6861-2024-90-12-27-34

13. Zolotarev K. V., Ancharov A. I., Vinokurov Z. S., Goldenberg B. G., Darin F. A., Kriventsov V. V., Kulipanov G. N., Cooper K. E., Legkodymov A. A., Lyubas G. A., Nikolenko A. D., Ten K. A., Tolochko B. P., Sharafutdinov M. R., Shmakov A. N., Levichev E. B., Piminov P. A., Zhuravlev A. N. Synchrotron Radiation Based Research at the Novosibirsk Scientific Center. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023, vol. 87, no. 5, pp. 541–551. doi: 10.3103/s1062873822701635

14. Margolin V. I., Shishov S. E. *Perspektivy i problemy nanotekhnologii* [Prospects and Problems of Nanotechnolo-

gies]. *O natsionalnoy doktrine razvitiya v Rossiyskoy Federatsii nanotekhnologii: analiticheskiy sbornik*. Moscow, *Izдание Soveta Federatsii*, 2006, pp. 54–63. (In Russ.)

15. GOST R 52250–2004. *Materialy elektronnoy tekhniki. Rezisty dlya litograficheskikh protsessov. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Materials of Electronic Engineering. Resists for Lithographic Processes. General Specifications]. Moscow, *Izd-vo standartov*, 2004. (In Russ.)

16. Margolin V. I., Tupik V. A. Study of Lithographic Characteristics of Electron And X-Ray Resists]. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 1998, iss. 1, pp. 82–85. (In Russ.)

17. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies]. Moscow, *Nauka-Fizmatlit*, 2007, 416 p. (In Russ.)

18. Kalinin B. D., Plotnikov R. I., Rechinsky A. A. The Using Of X-Ray Spectrometry for Identification Organic Compounds and Materials. 2011, vol. 15, no. 1, pp. 56–63. (In Russ.)

19. Naz'mov V. P. Deep 3D X-Ray Lithography Based on High-Contrast Resist Layers. *Technical Physics Let.* 2019, vol. 45, iss. 9, pp. 906–908. doi: 10.1134/S1063785019090256

20. Glagolev P. Yu., Demin G. D., Korneev V. I., Dyuzhev N. A. Aspects of Image Formation in Compound Refractive Lenses in the Soft X-Ray Wavelength Range. *Technical Physics*. 2024, vol. 69, iss. 7, pp. 1095–1106. (In Russ.)

Information about the authors

Arkady A. Ivanov, Dr Sci. (Eng.) (2018), Professor (2020) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: ECB development; design of radio-electronic equipment and microwave devices. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aai2@yandex.ru

Vladimir I. Margolin, Dr Sci. (Eng.) (1998), Professor (1999) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology; physicochemical properties of organic and inorganic composite materials, and fractals. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: v.margolin@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6322-0727>

Andrey V. Nikiforov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1987), Leading specialist in innovation activities of Magnetron J.S. Co. The author of 15 scientific papers. Area of expertise: magnetic phenomena in solid state bodies. Address: Magnetron J.S. Co., 9, Kurchatova St., St Petersburg 194223, Russia E-mail: nikiforovav@magnetron.ru

Nguyen Viet An, Specialist in "Radio-electronic Systems" (2016, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense), postgraduate student of the Department of Microelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of one scientific publication. Area of expertise: development of electronic components and microwave devices; radar; nanomaterials; artificial intelligence. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: kphivan95@gmail.com <https://orcid.org/0009-0001-8660-3050>

Galina V. Petrova, Cand. Sci. (Eng.) (1989), Associate Professor (1993), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 70 scientific publication. Area of expertise: instrument engineering technology; computer-aided design of technological processes; expert systems, as well as development and investigation of resist materials for micro- and nanolithography. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: pgv50@mail.ru

Artemy I. Protchenko, engineer specializing in Materials Science and Technologies of New Materials (1998, Leningrad Mining Institute), Deputy Director General for State Equipment Order of JSC "Research Institute Ferrite-Domain". The author of a number of closed publications on the synthesis of materials for use in high-power microwave devices. Area of expertise: development of ferrite and dielectric materials for passive ECB and microwave devices. Address: JSC "Research Institute Ferrite-Domain", 25, room 3, lit. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg, 196006, Russia e-mail: a.i.protchenko@domen.ru

Anna A. Rassadina, Cand. Sci. (Eng.) (2007), Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 48 scientific publications. Area of expertise: development of sensor systems and materials science for biomedical diagnostics and nanotechnology. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: a.a.rassadina@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9906-7034>

Viktor A. Tupik, Dr Sci. (Eng.) (2011), Professor (2014) of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanotechnologies; radio-electronic device assembly technologies; energy- and resource-saving technologies; organization of technological processes in radio electronics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: vatupik@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3760-3468>

Natalia N. Sharova, Engineer with a degree in Applied Mathematics and Computer Science (1997, Vladimir Dahl East Ukrainian National University), Deputy General Director of JSC Research Institute Ferrite Domain. Area of expertise: development of mathematical models for ECB. Address: JSC "Research Institute Ferrite-Domain", 25, room 3, lit. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia e-mail: n.n.sharova@domen.ru

Irina S. Sholina, Design engineer-technologist of radio equipment (1972, Electrotechnical Institute n. a. V. I. Ulyanov (Lenin)), Senior Lecturer, Deputy Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: information technologies; physical and technological fundamentals of integrated circuit design. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: issholina@etu.ru

Andrey V. Korbut, Master's Degree in Materials Science and Technology (2023, SPbSET). Head of the Galvanic Coatings Sector of Magnetron Plant JSC. Postgraduate student of the Department of Chemical Nanotechnology and Electronic Engineering Materials of St Petersburg State Technological Institute (Technical University). The author of 1 scientific publication. Area of expertise: galvanic coatings; chemical nanotechnology; electronic engineering materials. Address: Magnetron J.S. Co., 9, Kurchatova St., St Petersburg 194223, Russia E-mail: andreykorbut93@yandex.ru

Электрофизические параметры совместимого с 3D-печатью композита, наполненного стеклянными полыми микросферами

Р. А. Платонов[✉], А. Г. Алтынников, А. Е. Комлев, А. А. Цымбалюк, А. Г. Гагарин

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

[✉] raplatonov@etu.ru

Аннотация

Введение. Развитие телекоммуникационных и радиолокационных систем, работающих в диапазоне 10...100 ГГц, требует материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (ϵ менее двух). Аддитивные технологии, такие, как DLP-печать, перспективны для создания объемных устройств, однако контроль воздушных полостей в фотополимерах затруднен из-за реологических свойств материалов. В статье предложены способы изготовления композитного материала на основе фотополимерной матрицы и полых стеклянных микросфер (ПСМ) для снижения эффективной диэлектрической проницаемости.

Цель работы. Исследование методов изготовления смеси фотополимерного связующего с ПСМ и анализ СВЧ-параметров образцов, полученных двумя способами: послойным фотоотверждением и из взвеси, для достижения ϵ менее двух.

Материалы и методы. Расчет эффективной диэлектрической проницаемости выполнен методом конечных элементов в электростатическом и электродинамическом (10 ГГц) режимах. Матрица композита – прозрачная фотополимерная смола Anycubic Clear, наполнитель – полые микросферы диоксида кремния со средним размером частицы около 50 мкм. Измерения электрофизических параметров проведены с помощью векторного анализатора цепей Ceysar 3272C.

Результаты. Разработана система рециркуляции смеси для DLP-принтеров, позволяющая изготавливать композиты с малой объемной долей наполнителя. Смесь фотополимера и ПСМ в соотношении 5.5:1 снизила диэлектрическую проницаемость на 10 % по сравнению с ненаполненным фотополимером. Приготовление взвеси ПСМ в объеме смолы позволило значительно повысить долю наполнителя, что привело к снижению проницаемости на 40 %.

Заключение. Использование взвеси обеспечивает снижение диэлектрической проницаемости с 2.9 до 1.75, т. е. на 40 %. Разработанная система рециркуляции совместима с коммерческими 3D-принтерами для изготовления образцов с малой объемной долей ПСМ (до 5...7 %).

Ключевые слова: 3D-печать, композит, стеклянные микросферы, эффективная диэлектрическая проницаемость

Для цитирования: Электрофизические параметры совместимого с 3D-печатью композита, наполненного стеклянными полыми микросферами / Р. А. Платонов, А. Г. Алтынников, А. Е. Комлев, А. А. Цымбалюк, А. Г. Гагарин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 57–69.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-57-69

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-01438-22-07 (FSEE-2025-0009).

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; принята к публикации после рецензирования 16.05.2026; опубликована онлайн 29.06.2026



Electrophysical Parameters of a 3D-Printable Composite Filled with Hollow Glass Microspheres

Roman A. Platonov✉, Andrey G. Altynnikov, Andrey E. Komlev,
Andrey A. Tsymbalyuk, Alexander G. Gagarin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉raplatonov@etu.ru

Abstract

Introduction. The development of telecommunication networks and radar systems operating in the 10...100 GHz range requires materials with low dielectric permittivity (ϵ less than two). Additive technologies, such as digital light processing (DLP), are promising for fabrication of 3D devices; however, controlling air void distribution in photopolymers remains challenging due to their rheological properties. This paper proposes an approach for developing a composite material based on a photopolymer matrix and hollow glass microspheres (HGM) aimed at reducing the effective permittivity of the material.

Aim. To study approaches for obtaining a mixture of a photopolymer binder and HGM and to compare the microwave parameters of samples obtained by layer-by-layer photocuring and polymerization from a suspension, to achieve ϵ less than two.

Materials and methods. The effective permittivity was calculated using the finite element method in both electrostatic and electrodynamic (10 GHz) modes. The Anycubic Clear transparent photopolymer resin was used as the composite matrix, and hollow silicon dioxide microspheres with an average particle size of about 50 μm were used as the filler. Electrophysical parameters were measured using a Ceyear 3272C vector network analyzer.

Results. A mixture recycling system for DLP printers is developed, enabling the production of composites with a low filler volume fraction. The 5.5:1 mixture of photopolymer and HGM reduced permittivity by 10% compared to the unfilled photopolymer. The preparation of an HGM suspension in the resin volume made it possible to significantly increase the filler content, which led to a 40 % reduction in permittivity.

Conclusion. The use of a suspension reduces the dielectric constant from 2.9 to 1.75, corresponding to a 40 % decrease. The developed recirculation system is compatible with commercial 3D printers and enables the fabrication of samples with low HGM concentrations (up to 5...7 %).

Keywords: 3D printing, composite, glass microspheres, effective permittivity

For citation: Platonov R. A., Altynnikov A. G., Komlev A. E., Tsymbalyuk A. A., Gagarin A. G. Electrophysical Parameters of a 3D-Printable Composite Filled with Hollow Glass Microspheres. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 57–69.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-57-69

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

Source of funding. This research was funded by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-01438-22-07 (FSEE-2025-0009).

Submitted 27.01.2026; accepted 16.05.2026; published online 29.06.2026

Введение. Активное развитие систем телекоммуникации и радиолокации с рабочими частотами в диапазоне 10...100 ГГц требует разработки материалов с малым значением диэлектрической проницаемости. Как известно, значение диэлектрической проницаемости (ϵ) материала определяет скорость распространения сигнала, а значит, время задержки в линиях передачи приемопередающих трактов [1, 2]. Снижение фазовой и групповых скоростей также обуславливает снижение длины

волны, проходящей через более диэлектрически плотную среду по сравнению с воздухом, что в свою очередь ведет к снижению геометрических размеров основных элементов волноведущего тракта. На частотах до 10...15 ГГц данный эффект носит скорее положительный характер, так как позволяет миниатюризировать СВЧ-устройства и улучшать массогабаритные характеристики устройства в целом. Однако на более высоких рабочих частотах подобная миниатюризация может приводить

к избыточным требованиям к технологии изготовления, не влияя существенно на массогабаритные характеристики.

В контексте аддитивного производства компонентов для сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, таких, как линзовые антенны, диэлектрические резонаторы и фильтры, особое место занимают методы печати вязкими суспензиями. Эти технологии позволяют работать с керамонаполненными фотополимерами и композитами на основе керамики. Среди множества подходов можно выделить 3 основных метода, различающихся по физическому принципу формообразования и областям применения: прямую чернильную печать (Direct Ink Writing – DIW); струйную печать (Inkjet printing) и технологии фотополимеризации в ванне (Vat Photopolymerization), включая стереолитографию (stereolithography – SLA) и цифровую светодиодную проекцию (digital light processing – DLP).

Технология DIW основана на экструзии вязкой пасты через перемещающееся сопло с последующим послойным построением трехмерной структуры. Ключевое преимущество DIW по отношению к струйной печати – способность работать с суспензиями высокой вязкости, включая пасты с высоким содержанием твердых керамических частиц [3, 4]. Струйная печать керамическими суспензиями часто сталкивается с проблемой засорения сопел из-за оседания частиц, в то время как экструзионные методы более устойчивы к вариациям реологических характеристик. Однако несмотря на описанные ранее преимущества технологии DIW при работе с высоковязкими керамическими суспензиями, ее применение в промышленном масштабе сталкивается с серьезными ограничениями. В отличие от струйной печати или технологий стереолитографии DIW демонстрирует слабую масштабируемость и в подавляющем большинстве случаев остается инструментом лабораторного или мелкосерийного прототипирования.

При изготовлении объемных диэлектрических устройств с заданным распределением диэлектрических параметров (линзы Люнеберга и др.) [5, 6] целесообразно использовать такие аддитивные технологии, как FDM (fused deposition modeling), DLP – трехмерную печать [6, 7]. Ис-

пользование трехмерной печати позволяет создать объемный материал с распределенными воздушными полостями, объемная доля которых будет определять эффективную диэлектрическую проницаемость (ϵ_{ef}) итогового материала. В [8] приводится анализ влияния цилиндрических воздушных полостей на эффективную диэлектрическую проницаемость композитного материала. Как показали результаты исследования, в случае DLP трехмерной печати формирование воздушных полостей позволяет снизить диэлектрическую проницаемость, однако перспективность данного метода ограничена ввиду сложности контроля формы и размера формируемых воздушных полостей из-за вязкости фотополимерных смол и возникающего капиллярного эффекта. Еще один способ снижения значения ϵ_{ef} – использование в качестве добавки полых стеклянных микросфер (PCM) для формирования композитного материала [1, 2]. Однако применение наполнителей с объемной долей до 15...20 % в серийно выпускаемых фотополимерных смолах приводит к изменению не только диэлектрических, но и реологических свойств смеси, вплоть до непригодности для использования в серийно выпускаемых трехмерных принтерах [9–11].

В данной статье описываются способы изготовления образцов композитного материала и влияние на его свойства объемной доли PCM.

Методы (материалы и методы). Существует множество аналитических, а также полумпирических формул и выражений для определения эффективной диэлектрической проницаемости неоднородной среды. В общем случае композитный материал можно представить в виде двухкомпонентной системы, состоящей из двух сред с однородными и изотропными характеристиками. При этом одна из сред представляется в виде случайно распределенных дискретных вкраплений. В простейшем случае вкрапления материала наполнителя представляются в форме несовпадающих сфер. Таким образом, задача определения ϵ_{ef} сводится к описанию распределения электрического поля в объеме композитной среды. Одной из нашедших широкое применение является модель Максвелла–Гарнетта (МГ), однако допущение, сделанное при получении правила смеси МГ, не учитывает влияние частиц напол-

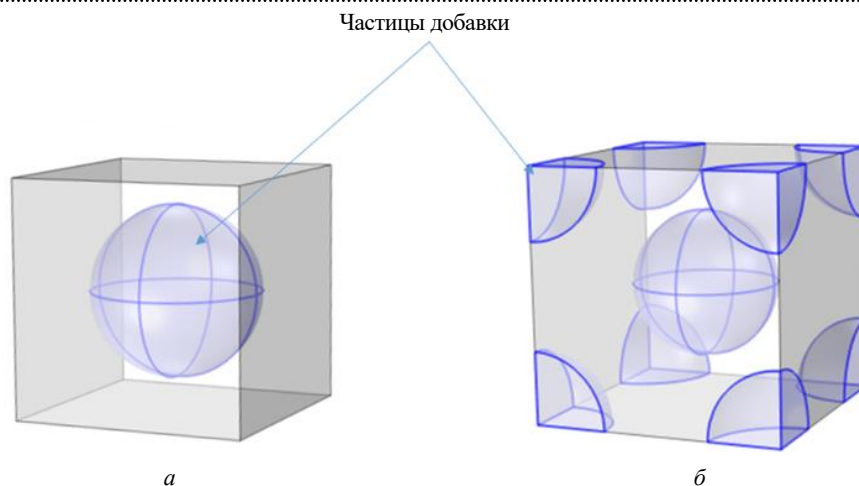


Рис. 1. Простая кубическая (а) и объемно-центрированная кубическая (б) элементарные ячейки

Fig. 1. Simple cubic (a) and body-centered cubic (b) unit cell

нителя на распределение поля в материале матрицы, что является очевидным недостатком данной модели. Тем не менее, несмотря на свою простоту, правило смеси МГ применяется достаточно широко за счет множества вариаций для учета формы частиц наполнителя (цилиндры, диски, эллипсоиды, иглы и т. д.) [12, 13]. Большинство аналитических моделей, как правило, теряют точность при увеличении объемной доли наполнителя или увеличении контраста диэлектрических проницаемостей материалов наполнителя и матрицы.

Более универсальными являются численные методы, такие, как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей во временной области и метод моментов. При определении эффективной диэлектрической проницаемости среды с несколькими компонентами численными методами появляется возможность расчета значений напряженности электрического поля непосредственно для заданной структуры. Тем не менее моделирование и численный расчет характеристик материала неограниченного объема практически невозможны, что требует выделения модельной структуры, свойства которой будут определять свойства объемного материала.

Моделирование диэлектрической проницаемости композитного материала с ПСМ в качестве наполнителя осуществлялось с помощью МКЭ. Расчет проводился на частоте 10 ГГц и в электростатическом режиме. Для моделирования электрического отклика композитного материала при равномерном распределении частиц добавки

можно использовать элементарную ячейку кубического типа [14–16]. В зависимости от объемной доли (плотности упаковки) частиц наполнителя целесообразно использовать простую (до 52 % заполнения) или объемно-центрированную (до 68 % заполнения) кубическую элементарную ячейку. Схематично модели простой (ПК) и объемно-центрированной кубической (ОЦК) элементарных ячеек представлены на рис. 1.

В электростатическом режиме элементарная ячейка композитного материала представляется как диэлектрическое заполнение плоскопараллельного конденсатора, тогда энергия электрического поля, накопленная в таком конденсаторе:

$$W = \frac{C\Delta U^2}{2} = \frac{\varepsilon_{\text{ef}} d \Delta U^2}{2},$$

где C – электрическая емкость конденсатора; ΔU – разность потенциалов между обкладками конденсатора; ε_{ef} – эффективная диэлектрическая проницаемость композитного материала; d – размер ребра кубической элементарной ячейки. При этом электрическая энергия, накопленная в объеме, состоящем из конечных элементов трехмерной расчетной сетки:

$$W = \sum_k \delta W = \frac{1}{2} \int_{S_k} \varepsilon_k \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy,$$

где ε_k и S_k – диэлектрическая проницаемость и площадь поверхности k -элемента соответственно. Граням элементарной ячейки, соответствующим обкладкам плоскопараллельного

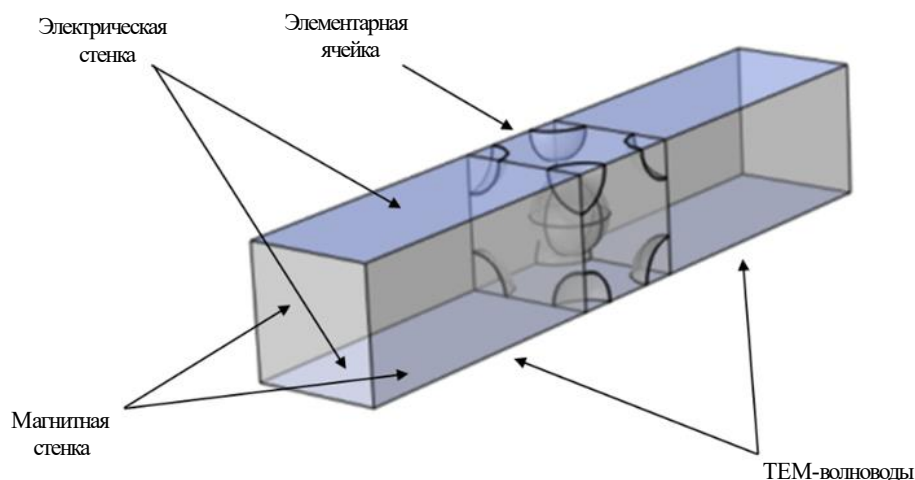


Рис. 2. Модель расчета эффективной диэлектрической проницаемости на частоте 10 ГГц

Fig. 2. Model for calculating the effective permittivity at a frequency of 10 GHz

конденсатора, присваивались такие граничные условия постоянного электрического потенциала, что разница между ними $\Delta U \neq 0$. Остальные грани ячейки соответствовали условию неизменности заряда внутри объема ячейки.

Для расчета частотного отклика моделируемых кубических элементарных ячеек использовалась модель с двумя идеальными ТЕМ-волноводами с поперечными размерами, соответствующими размеру грани элементарной ячейки. Волна, возбужденная в одном из волноводов, распространяется сквозь элементарную ячейку до идеально согласованного порта, расположенного на конце второго волновода. Расчетная модель с соответствующими граничными условиями приведена на рис. 2.

Рассчитанные методом конечных элементов параметры матрицы рассеяния на заданных частотах обрабатываются для исключения влияния волноводов. После деэмбединга полученные частотные зависимости S -параметров используются как входные данные для расчета диэлектрической проницаемости элементарной ячейки методом Николсона–Росса–Вейра (НРВ) [17].

Основная сложность изготовления образцов композитного материала на основе фотополимерной смолы заключается в существенной разнице плотностей порошка ПСМ и смолы. После перемешивания частицы наполнителя под действием силы Архимеда всплывают из объема фотополимерной смолы, образуя взвесь на поверхности смеси. Также стоит заметить, что увеличение доли частиц наполнителя в смеси

приводит к росту ее вязкости, что в свою очередь негативно влияет на качество 3D-печати методом DLP, вплоть до расслоения образца в процессе послойного фотоотверждения.

Для исследования влияния объемной доли наполнителя на эффективную диэлектрическую проницаемость композитного материала образцы изготавливались двумя способами. Первый способ основан на послойном фотоотверждении смеси с помощью 3D-DLP-принтера. Второй способ заключался в формировании взвеси с различной объемной долей фотополимерной смолы и ручном формировании образцов для фотоотверждения с помощью ультрафиолетовой лампы.

Для получения смеси с равномерным распределением частиц наполнителя была разработана система рециркуляции смеси на основе перистальтических насосов. Схема рабочей области 3D-принтера с системой рециркуляции представлена на рис. 3. Опорная платформа 3D-принтера 1 в процессе печати образца 3 погружается в резервуар 4 со смесью фотополимерной смолы, дно резервуара является прозрачным и представляет собой натянутую FEP-пленку 8 толщиной 100 мкм для беспрепятственной засветки, формируемой LCD-матрицей принтера 7. Для обеспечения циркуляции смеси фотополимерной смолы и наполнителя в опорной платформе были сделаны сквозные отверстия для ввода силиконовых трубок 2 с внутренним диаметром 10 мм. Непрерывное перемешивание смеси осуществляется в дополнительном резервуаре 5 с помощью магнитной мешалки, цирку-

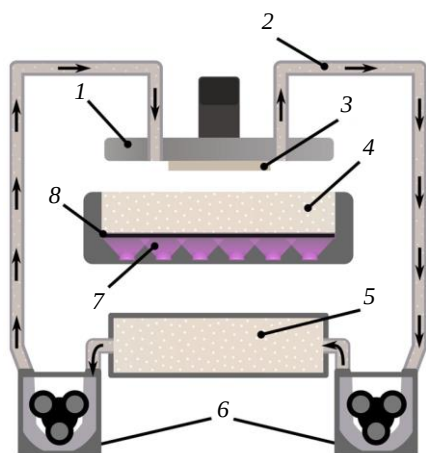


Рис. 3. Система рециркуляции смеси для послойного фотоотверждения с помощью 3D-принтера

Fig. 3. A mixture recirculation system for layer-by-layer photocuring using a 3D-printer

ляция смеси в системе достигается за счет двух перистальтических насосов 6.

Объемная доля частиц ПСМ в смеси оценивалась по выражению

$$v_{\text{чсн}} = 1 - \frac{V_{\text{фп}}}{V_{\text{см}}},$$

где $V_{\text{фп}}$ – объем фотополимерной смолы; $V_{\text{см}}$ – объем смеси фотополимера и ПСМ. Для изготовления смеси навеска ПСМ помещалась в мерную емкость для последующего смешивания с фотополимерной смолой. Смесь фотополимерной смолы и порошка ПСМ готовилась в соотношении 5.5:1. Полученная смесь переливалась в резервуар для смешивания 5 перед началом печати образца. Печать образцов с размерами $50 \times 50 \times 1$ мм осуществлялась при следующих параметрах: толщина слоя 50 мкм, время засветки 1.2 с на слой. Контроль толщины изготовленных образцов осуществлялся с помощью микрометра МКЦ-25. Фотография изготовленных образцов приведена на рис. 4.

Взвесь изготовлялась методом "всплытия" ПСМ в объеме фотополимерной смолы. Для этого в мерную емкость помещался заданный объем порошка ПСМ, затем добавлялся известный объем прозрачной фотополимерной смолы (Anusubic clear). Частицы порошка ПСМ, имеющие меньшую плотность по сравнению с фотополимерной смолой, начинают постепенно всплывать к границе раздела с воздухом. Условно можно выделить несколько этапов формирования взвеси, схематично представленных на рис. 5.

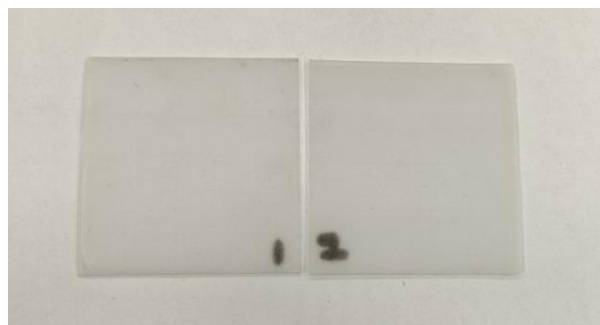


Рис. 4. Фотографии образцов синтактного композита, изготовленного методом послойного фотоотверждения

Fig. 4. Photographs of samples of syntactic composite produced by layer-by-layer photocuring

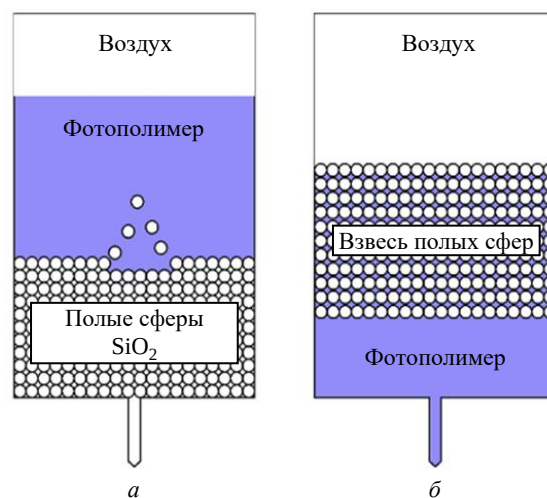


Рис. 5. Схема изготовления взвеси: а – всплытие ПСМ со дна мерной емкости; б – формирование границы раздела между взвесью и фотополимерной смолой

Fig. 5. Scheme of suspension preparation: а – HGM rise from the bottom of the measuring container; б – formation of an interface between the suspension and the photopolymer resin

Первый этап характеризуется постепенным снижением объема ПСМ на дне мерной емкости за счет потока частиц к границе раздела с воздухом. Следующий этап характеризуется формированием отчетливой границы раздела между взвесью и чистым фотополимером. Завершение первого этапа при комнатной температуре занимает около 5 ч. Ввиду формирования четкой границы раздела с фотополимерной жидкостью можно оценить объемную долю ПСМ во взвеси с помощью выражения

$$v_{\text{чсн}} = 1 - \frac{\Delta V_{\text{фп}}}{V_{\text{вз}}},$$

где $\Delta V_{\text{фп}}$ – разница между исходным и измененным (после формирования границы раздела

со взвесью) объемами фотополимерной смолы; $V_{вз}$ – объем, занимаемый взвесью.

Стоит заметить, что образование четко различимой границы раздела не означает формирования взвеси с неизменной во времени концентрацией частиц наполнителя. Под действием силы тяжести фотополимерная смола продолжает просачиваться, приводя к постепенному снижению $\Delta V_{фп}$, а следовательно, к увеличению $v_{чсн}$. Продолжающееся просачивание также обуславливает существенную неравномерность концентрации частиц наполнителя по толщине слоя взвеси.

Для экспериментального исследования диэлектрической проницаемости образцов взвесь готовилась в трех одинаковых мерных емкостях объемом 50 мл при использовании одинакового количества исходных материалов: 10 мл порошка ПСМ и 20 мл фотополимерной смолы. После формирования границы раздела с фотополимерной жидкостью взвесь выдерживалась ~2 и ~5 ч в соответствующих мерных объемах до слива фотополимерной смолы через клапан.

Форма для фотоактивации взвеси состояла из металлической рамки с отверстием прямоугольной формы с размерами 23×10 мм и двух прозрачных стекол. Данные размеры соответствуют поперечному сечению прямоугольного волновода, используемого для из-

мерения диэлектрической проницаемости образцов. После ручного нанесения и разравнивания взвеси в прямоугольном отверстии рамки, расположенной на одном из стекол, форма накрывалась вторым стеклом и фиксировалась тремя пластиковыми пружинными струбцинами. Для фотоактивации использовалась ультрафиолетовая лампа мощностью 15 Вт, длительность засветки составляла 2 мин с каждой стороны для образцов толщиной 1 мм. На рис. 6 показана фотография изготовленных образцов. Используемая конструкция отличается простотой и позволяет формировать сплошные образцы отвержденного композита с требуемыми поперечными размерами.

Результаты. Результаты численного моделирования в электростатическом режиме и на частоте 10 ГГц представлены на рис. 7 для простой и объемно-центрированной кубических ячеек. Частица наполнителя представляла собой полую сферу диаметром 50 мкм с толщиной оболочки ~750 нм с воздушным заполнением. Диэлектрическая проницаемость оболочки составляла 3.9, что соответствует диэлектрической постоянной диоксида кремния SiO_2 . Диэлектрическая проницаемость материала матрицы принималась равной 2.9, что соответствует результатам экспериментального исследования образцов фотоотвержденной прозрачной смолы Anycubic clear.

Диэлектрическая проницаемость образцов, изготовленных методом послойного фотоот-

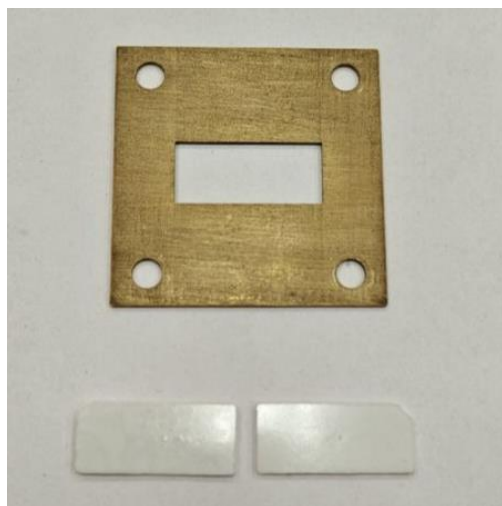


Рис. 6. Фотография элемента волноводного измерительного тракта и изготовленных образцов композитного материала

Fig. 6. Photograph of an element of the waveguide measuring path and the manufactured samples of composite material

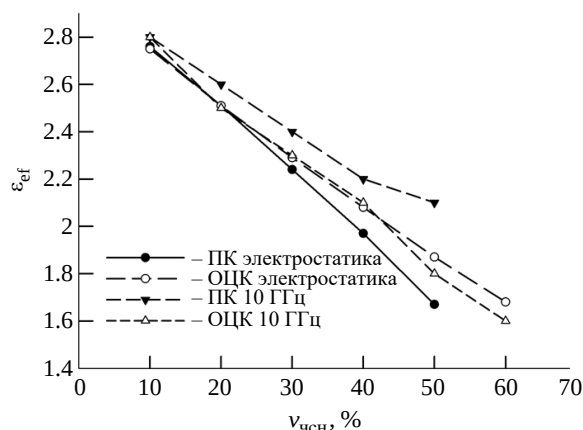


Рис. 7. Результаты моделирования эффективной диэлектрической проницаемости композитного композита

Fig. 7. Simulation results of the effective dielectric constant of the composite material

верждения, измерялась с помощью разборного цилиндрического резонатора на частоте около 10 ГГц. Данная резонансная методика была выбрана по нескольким причинам. Во-первых, она обеспечивает высокую точность определения СВЧ-параметров, погрешность измерения диэлектрической проницаемости не превышает 1 %. Во вторых, метод не требует сложной калибровки, в отличие от волноводных методов, и менее чувствителен к контакту между образцом и металлическими стенками. Конструктивно резонатор состоял из двух одинаковых отрезков цилиндрического волновода, между фланцами которых устанавливался исследуемый образец. Обязательным требованием к образцам при использовании данной методики является наличие поверхности с размерами не менее 50×50 мм. Для обеспечения соосности половин резонатора применялись направляющие шпильки, а для создания равномерного прижима использовались фиксирующие гайки. Возбуждение резонансных колебаний осуществлялось через коаксиальные вводы с петлями связи, расположенными на торцах резонатора. Более подробно методика измерения описана в [18, 19]. Результаты измерения показали снижение значения диэлектрической проницаемости до $2.65 \dots 2.75$ при соотношении фотополимерной смолы к ПСМ 5.5:1.

Для исследования образцов, изготовленных из взвеси, применение цилиндрического резонатора оказалось затруднительным. Изготовление образцов с размерами поверхности 50×50 мм из

взвеси требует ручного разравнивания материала в форме, что приводит к неоднородности толщины и нарушению плоскостности образца. Поэтому для данных образцов был выбран волноводный метод НРВ. Этот метод основан на измерении комплексных коэффициентов отражения и пропускания образца, помещенного в прямоугольный волновод. Преимущество метода НРВ – возможность определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в широкой полосе частот. В описываемой работе измерения проводились в диапазоне от 8.15 до 12.05 ГГц. Кроме того, волноводный метод позволил использовать саму измерительную секцию волновода в качестве формы для фотоотверждения. Поперечные размеры формы (23×10 мм) точно соответствуют размерам волновода, что минимизирует зазоры между образцом и стенками. Измерения выполнялись с помощью векторного анализатора цепей Seuear 3672C, а расчет параметров производился по алгоритму НРВ [17] после процедуры деэмбединга, позволяющей исключить влияние соединительных волноводов и переходов.

Результаты измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов, изготовленных из взвесей с выдержкой 2 и 5 ч, приведены на рис. 8. Также для сравнения приведены результаты измерения отвержденного фотополимера без добавления ПСМ. Приведенные результаты являются усредненными значениями по каждой серии образцов, состоящей не менее чем из 5 шт.

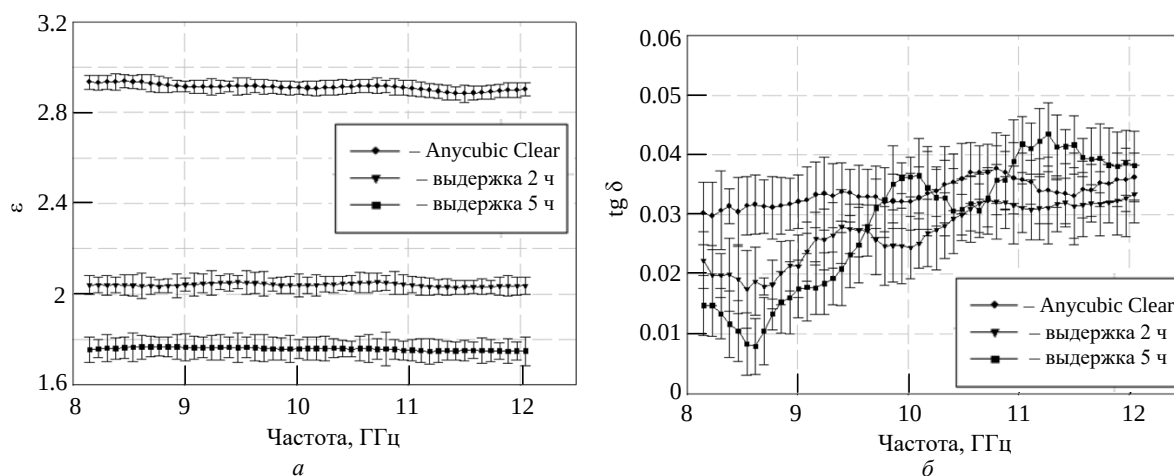


Рис. 8. Результаты измерения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) образцов композитного материала

Fig. 8. Measurement results of the dielectric constant (a) and dielectric loss tangent (b) of composite material samples

Обсуждение (Заключение. Выводы). Результаты моделирования эффективной диэлектрической проницаемости методом конечных элементов для двух типов элементарных ячеек позволяют сделать важный вывод о применимости электростатического приближения для расчетов в СВЧ-диапазоне. Сравнение проводилось для двух конфигураций элементарных ячеек: простой кубической ячейки, в которой сфера расположена в центре куба, и объемно-центрированной кубической. Для простой кубической ячейки различие между электростатическим и электродинамическим расчетами оказалось заметно больше и достигло $\sim 10\%$. Это можно объяснить тем, что при простой упаковке сфер материал наполнителя занимает сравнительно малый объем ячейки, а большая часть объема приходится на матрицу. В таком случае электрическое поле в ячейке распределено неравномерно, а границы раздела сред ориентированы преимущественно перпендикулярно направлению внешнего поля. При переходе к высоким частотам на этих границах возникают локальные поляризационные токи, которые в электростатическом приближении не учитываются, что и приводит к расхождению результатов. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показывает меньшее расхождение при использовании ОЦК как в случае электростатики, так и при электродинамическом моделировании.

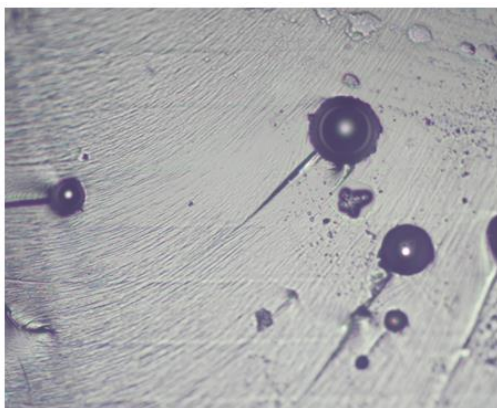
При интерпретации полученных результатов необходимо учитывать несколько факторов,

влияющих на их точность. Во-первых, оценка объемной доли наполнителя $v_{\text{чсн}}$ сопровождается значительным разбросом, достигающим $\pm 10\%$. Это связано с неоднородностью распределения микросфер во взвеси, особенно после непродолжительной выдержки в 2 ч, когда процесс просачивания фотополимера еще не завершился. Во-вторых, моделирование дает диапазон значений ϵ_{ef} от 2.1 до 1.65 для $v_{\text{чсн}}$ около 50 %, что отражает чувствительность результата к микроструктуре, в частности к наличию или отсутствию контактов между микросферами (таблица). В-третьих, измерение методом НРВ также вносит погрешность, связанную с наличием воздушных зазоров между образцом и стенками волновода. В описываемой работе образцы изготавливались непосредственно в волноводной секции, что минимизировало этот эффект. Наконец, возможное разрушение части микросфер в процессе перемешивания или фотоотверждения могло привести к уменьшению эффективной объемной доли полостей и, следовательно, к завышению измеренной диэлектрической проницаемости. Однако микрофотографии на рис. 9 не показывают

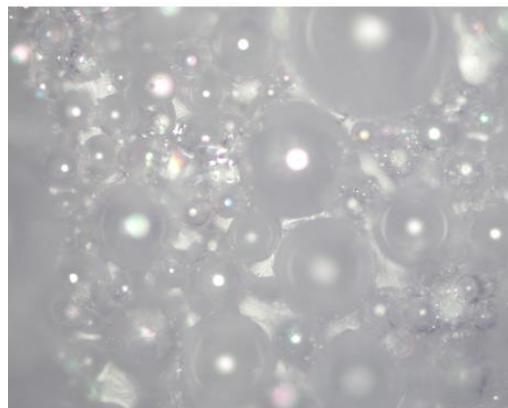
Сравнение результатов моделирования
и экспериментального исследования

Comparison of simulation
and experimental results

Выдержка взвеси, ч	$v_{\text{чсн}}, \%$	ϵ_{ef}	
		Моделирование (ОЦК)	Измерения (НРВ)
~ 2	45 ± 10	2.2...1.9	2.05 ± 0.05
~ 5	50 ± 10	2.1...1.65	1.75 ± 0.05



а



б

Рис. 9. Микрофотография образцов композитного материала, изготовленного методом послойного отверждения (а) и из взвеси (б)

Fig. 9. Micrograph of composite material samples produced by layer-by-layer curing (а) and from a suspension (б)

массового разрушения сфер.

Сравнение двух использованных методов изготовления образцов показывает их принципиальные различия, каждое из которых определяет область применения. Метод послойного фотоотверждения с системой рециркуляции совместим с коммерческими DLP-принтерами и позволяет изготавливать образцы сложной геометрической формы, однако объемная доля наполнителя в таких образцах невелика. Достигнутое снижение диэлектрической проницаемости составило около 10 % по сравнению с чистым фотополимером. Это связано с тем, что при объемной доле ПСМ выше 5...7 %

смесь становится слишком вязкой и DLP-печать невозможна из-за расслоения образца при отрыве от FEP-пленки. Метод изготовления из взвеси, напротив, позволяет достичь объемной доли наполнителя более 40 % и снижения проницаемости до 60 %, однако этот метод не совместим с DLP-печатью. Полученная взвесь обладает высокой вязкостью и неоднородностью концентрации по толщине, что исключает ее использование в стандартных DLP-принтерах. Тем не менее взвесь может быть перспективна для альтернативных аддитивных технологий, в частности для прямой контурной печати вязкими суспензиями.

Авторский вклад

Платонов Роман Андреевич – постановка задач; моделирование; обработка результатов эксперимента; написание текста статьи.

Алтынников Андрей Геннадиевич – обработка результатов эксперимента; написание текста статьи.

Комлев Андрей Евгеньевич – общее руководство исследованием; редактирование статьи.

Цымбалюк Андрей Александрович – изготовление экспериментальных образцов материала; проведение измерений электрических параметров материала.

Гагарин Александр Геннадиевич – проведение измерений электрических свойств материала; обработка результатов эксперимента.

Author's contribution

Roman A. Platonov, problem formulation; modeling; experimental results processing; article writing.

Andrey G. Altynnikov, experimental results processing; article writing.

Andrey E. Komlev, overall research supervision; article editing.

Andrey A. Tsymbalyuk, fabrication of experimental material samples; measurement of electrical parameters of the material.

Alexander G. Gagarin, measurement of electrical properties of the material; experimental results processing.

Список литературы

1. Development of a High-Frequency Polytetrafluoroethylene (PTFE)-Based Laminate With An Ultra-Low Dielectric Constant by Combination of Ceramic Hollow Spheres and PTFE Resin / C. Wu, Q. Li, Y. Hong, B. Feng, W. Hu, L. Sun // *ChemistrySelect*. 2024. Vol. 9, № 13. P. 1–6. Art. № e202303461. doi: 10.1002/slct.202303461

2. Dielectric properties of polyimide/SiO₂ hollow spheres composite films with ultralow dielectric constant / Z. Hong, W. Dongyang, F. Yong, Ch. Hao, Y. Yusen, Y. Jiaojiao, J. Liguang // *Materials Science and Engineering: B*. 2016. Vol. 203. P. 13–18. doi: 10.1016/j.mseb.2015.10.003

3. A low-cost, open-source 3D printer for multimaterial and high-throughput direct ink writing of soft and living materials / J. D. Weiss, A. Mermin-Bunnell, F. S. Solberg, T. Tam, L. Rosalia, A. Sharir, D. Rüttsche, S. Sinha, P. S. Choi, M. Shibata, Y. Palagani, R. Nilkant, K. Paulvannan, M. Ma, M. A. Skylar-Scott // *Advanced Materials*. 2025. Vol. 37, № 10. Art. № e2414971. doi: 10.1002/adma.202414971

4. Effective, versatile and inexpensive extruder system for direct ink writing of high-viscosity pastes / P. Rodríguez-Lagar, A. Reguera-García, R. Llamas-Unzueta, C. Blanco, R. Santamaría, M. A. Montes-Morán, J. A. Menéndez, V. G. Rocha // *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131, № 9. P. 4739–4753. doi: 10.1007/s00170-024-13250-2

5. Low permittivity environmentally friendly lenses for ku band / M. Kokkonen, M. Nelo, J. Chen, S. Myllymaki, H. Jantunen // *Progress in Electromagnetics Research Let.* 2020. Vol. 93. P. 1–7. doi: 10.2528/pierl20060108

6. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas / I. Munina, I. Grigoriev, G. O'Donnell, D. Trimble // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 8790–8809. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239782

7. Additive manufacturing: a comprehensive review / L. Zhou, J. Miller, J. Vezza, M. Mayster, M. Raffay, Q. Jus-

tice, Z. Al Tamimi, G. Hansotte, L. D. Sunkara, J. Bernat // Sensors. 2024. Vol. 24, № 9. Art. № 2668.
doi: 10.3390/s24092668

8. Исследование электрофизических свойств композитного диэлектрического материала с низкой диэлектрической постоянной / Д. А. Кудрявцева, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев, А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов, А. Г. Гагарин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2025. Т. 91, № 8. С. 41–46.
doi: 10.26896/1028-6861-2025-91-8-41-46

9. Rheology guided additive manufacturing of thermosetting syntactic foams: mechanical behavior and failure mechanisms / C. Beckwith, J. Fadhel, A. Park, N. Gupta // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2025. Vol. 199. Art. № 109248.
doi: 10.1016/j.compositesa.2025.109248

10. Optimization of viscosity and composition of mixture of Cu powder and acrylate based resin for vat photopolymerization of metal components / A. Javed, O. ur R. Shah, S. Ahmad, D. Ahmed // Results in Engineering. 2023. Vol. 19. Art. № 101307.
doi: 10.1016/j.rineng.2023.101307

11. A thermoset shape memory polymer-based syntactic foam with flame retardancy and 3D printability / R. Abedin, X. Feng, J. Pojman Jr., S. Ibekwe, P. Mensah, I. Warner, G. Li // ACS applied polymer materials. 2022. Vol. 4, № 2. P. 1183–1195.
doi: 10.1021/acsapm.1c01596

12. Ari S. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 296 p.

13. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // J. of the Optical Society of America A. 2016. Vol. 33, № 7. P. 1244–1256.
doi: 10.1364/JOSAA.33.001244

14. Effective dielectric constant of periodic composite materials / B. Sareni, L. Krähenbühl, A. Beroual, C. Brosseau // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 80, № 3. P. 1688–1696.
doi: 10.1063/1.362969

15. Wu D., Chen J., Liu C. Numerical evaluation of effective dielectric properties of three-dimensional composite materials with arbitrary inclusions using a finite-difference time-domain method // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102, № 2. Art. № 024107.
doi: 10.1063/1.2756089

16. Modeling and simulation for effective permittivity of two-phase disordered composites / Y. Cheng, X. Chen, K. Wu, Sh. Wu, Y. Chen, Y. Meng // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 103, № 3. Art. № 034111.
doi: 10.1063/1.2838465

17. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials / E. J. Rothwell, J. L. Frasc, S. M. Ellison, P. Chahal, R. O. Ouedraogo // Progress in Electromagnetics Research. 2016. Vol. 157. P. 31–47.
doi: 10.2528/PIER16071706

18. An Adaptation of the Split-Cylinder Resonator Method for Measuring the Microwave Properties of Thin Ferroelectric Films in a “Thin Film–Substrate” Structure / A. Gagarin, D. Tsyganova, A. Altynnikov, A. Komlev, R. Platonov // Sensors. 2024. Vol. 24, № 3. Art. № 755.
doi: 10.3390/s24030755

20. Measuring Method of Dielectric Plates Microwave Parameters in X-Band / A. Gagarin, A. Altynnikov, A. Komlev, R. Platonov, Y. Hatsura, A. Kozyrev // IEEE 5th Eurasia Conf. on IOT, Communication and Engineering, Yunlin, Taiwan, 27–29 Oct. 2023. IEEE, 2023. P. 225–227.
doi: 10.1109/ECICE59523.2023.10383191

Информация об авторах

Платонов Роман Андреевич – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика; устройства СВЧ; антенны; СВЧ-материалы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: raplatonov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

Алтынников Андрей Геннадиевич – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 70 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейные материалы; устройства СВЧ; антенны; тонкие 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: agaltynnikov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Комлев Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники; плазма.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aekomlev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

Электрофизические параметры совместимого с 3D-печатью композита, наполненного стеклянными полыми микросферами
Electrophysical Parameters of a 3D-Printable Composite Filled with Hollow Glass Microspheres

Цымбалюк Андрей Александрович – магистр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2021), аспирант кафедры физической электроники и технологии, инженер научно-исследовательской лаборатории СВЧ-материалов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники; аддитивные технологии.

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

E-mail: aatsymbaliuk@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-4044-3167>

Гагарин Александр Геннадиевич – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – применение сегнетоэлектриков в СВЧ-электронике.

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

E-mail: aggararin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5673-2372>

References

1. Wu C., Li Q., Hong Y., Feng B., Hu W., Sun L. Development of a High-Frequency Polytetrafluoroethylene (PTFE)-Based Laminate With An Ultra-Low Dielectric Constant by Combination of Ceramic Hollow Spheres and PTFE Resin. *ChemistrySelect*. 2024, vol. 9, no. 13, pp. 1–6, art. no. e202303461. doi: 10.1002/slct.202303461
2. Hong Z., Dongyang W., Yong F., Hao Ch., Yusen Y., Jiaojiao Y., Liguojiao J. Dielectric Properties of Polyimide/SiO₂ Hollow Spheres Composite Films with Ultralow Dielectric Constant. *Materials Science and Engineering: B*. 2016, vol. 203, pp. 13–18. doi: 10.1016/j.mseb.2015.10.003
3. Weiss J. D., Mermin-Bunnell A., Solberg F. S., Tam T., Rosalia L., Sharir A., Rüttsche D., Sinha S., Choi P. S., Shibata M., Palagani Y., Nilkant R., Paulvanan K., Ma M., Skylar-Scott M. A. A Low-Cost, Open-Source 3D Printer for Multimaterial and High-Throughput Direct Ink Writing of Soft and Living Materials. *Advanced Materials*. 2025, vol. 37, no. 10, art. no. e2414971. doi: 10.1002/adma.202414971
4. Rodríguez-Lagar P., Reguera-García A., Llamas-Unzueta R., Blanco C., Santamaría R., Montes-Morán M. A., Menéndez J. A., Rocha V. G. Effective, Versatile and Inexpensive Extruder System for Direct Ink Writing of High-Viscosity Pastes. *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2024, vol. 131, no. 9, pp. 4739–4753. doi: 10.1007/s00170-024-13250-2
5. Kokkonen M., Nelo M., Chen J., Myllymaki S., Jantunen H. Low Permittivity Environmentally Friendly Lenses for Ku Band. *Progress in Electromagnetics Research Let.* 2020, vol. 93, pp. 1–7. doi: 10.2528/pierl20060108
6. Munina I., Grigoriev I., O'Donnell G., Trimble D. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas. *IEEE Access*. 2023, vol. 11, pp. 8790–8809. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3239782
7. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive Manufacturing: a Comprehensive Review. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 9, art. no. 2668. doi: 10.3390/s24092668
8. Kudryavtseva D. A., Tsybalyuk A. A., Komlev A. E., Altynnikov A. G., Platonov R. A., Gagarin A. G. Research of Electrophysical Properties of Composite Dielectric Material with Low Permittivity. *Industrial laboratory. Diagnostics of Materials*. 2025, vol. 91, no. 8, pp. 41–46. (In Russ.) doi: 10.26896/1028-6861-2025-91-8-41-46
9. Beckwith C., Fadhel J., Park A., Gupta N. Rheology Guided Additive Manufacturing of Thermosetting Syntactic Foams: Mechanical Behavior and Failure Mechanisms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025, vol. 199, art. no. 109248. doi: 10.1016/j.compositesa.2025.109248
10. Javed A., Shah O. ur R., Ahmad S., Ahmed D. Optimization of Viscosity and Composition of Mixture of Cu Powder and Acrylate Based Resin for Vat Photopolymerization of Metal Components. *Results in Engineering*. 2023, vol. 19, art. no. 101307. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101307
11. Abedin R., Feng X., Pojman Jr. J., Ibekwe S., Mensah P., Warner I., Li G. A Thermoset Shape Memory Polymer-Based Syntactic Foam with Flame Retardancy and 3D Printability. *ACS Applied Polymer Materials*. 2022, vol. 4, no. 2, pp. 1183–1195. doi: 10.1021/acsapm.1c01596
12. Ari S. *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. London, The Institution of Electrical Engineers, 1999, 296 p.
13. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett Approximation: Tutorial. *J. of the Optical Society of America A*. 2016, vol. 33, no. 7, pp. 1244–1256. doi: 10.1364/JOSAA.33.001244
14. Sareni B., Krähenbühl L., Beroual A., Brosseau C. Effective Dielectric Constant of Periodic Composite Materials. *J. Appl. Phys.* 1996, vol. 80, no. 3, pp. 1688–1696. doi: 10.1063/1.362969

15. Wu D., Chen J., Liu C. Numerical Evaluation of Effective Dielectric Properties of Three-Dimensional Composite Materials with Arbitrary Inclusions Using a Finite-Difference Time-Domain Method. *J. Appl. Phys.* 2007, vol. 102, no. 2, art. no. 024107. doi: 10.1063/1.2756089

16. Cheng Y., Chen X., Wu K., Wu Sh., Chen Y., Meng Y. Modeling and Simulation for Effective Permittivity of Two-Phase Disordered Composites. *J. Appl. Phys.* 2008, vol. 103, no. 3, art. no. 034111. doi: 10.1063/1.2838465

17. Rothwell E. J., Frasch J. L., Ellison S. M., Chahal P., Ouedraogo R. O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress in Electromagnetics Research.* 2016, vol. 157, pp. 31–47.

doi: 10.2528/PIER16071706

18. Gagarin A., Tsyganova D., Altynnikov A., Komlev A., Platonov R. An Adaptation of the Split-Cylinder Resonator Method for Measuring the Microwave Properties of Thin Ferroelectric Films in a "Thin Film-Substrate" Structure. *Sensors.* 2024, vol. 24, no. 3, art. no. 755.

doi: 10.3390/s24030755

20. Gagarin A., Altynnikov A., Komlev A., Platonov R., Hatura Y., Kozyrev A. Measuring Method of Dielectric Plates Microwave Parameters in X-Band. *IEEE 5th Eurasia Conf. on IOT, Communication and Engineering, Yunlin, Taiwan, 27–29 Oct. 2023. IEEE, 2023, pp. 225–227.*

doi: 10.1109/ECICE59523.2023.10383191

Information about the authors

Roman A. Platonov, Cand. Sci (Eng.) (2018), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; microwave devices; antennas.

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

E-mail: raplatonov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

Andrey G. Altynnikov, Cand. Sci (Eng.) (2010), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 70 scientific publications. Area of expertise: nonlinear materials; microwave devices; antennas; thin films.

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

E-mail: agaltynnikov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Andrey E. Komlev, Cand. Sci (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of materials for electronic engineering; plasma.

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

E-mail: aekomlev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

Andrey A. Tsymbalyuk, Master's degree in Electronics and Nanoelectronics (Saint Petersburg Electrotechnical University, 2021), Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technology, Engineer of the research laboratory of microwave materials and devices of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: technology of materials for electronic equipment; additive technologies.

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

E-mail: aatsymbaliuk@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-4044-3167>

Alexander G. Gagarin, Cand. Sci (Eng.) (2007), Associate Professor at the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: application of ferroelectrics in SHF electronics.

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

E-mail: aggagarin@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5673-2372>

Исследование DX-центров в AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT

А. В. Сапожников^{1, 2✉}, Р. С. Крюков^{1, 2}, А. И. Баранов³,
А. Л. Дудин², В. В. Перепеловский¹

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

²АО "Светлана-Рост", Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
им. Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉ avsapozhnikov@stud.etu.ru

Аннотация

Введение. При создании приборов на основе гетероструктур AlGaAs существенной проблемой является наличие DX-центров в сильнолегированных n -слоях. В рамках исследования изучалось влияние DX-центров на характеристики pHEMT. Проведено систематическое изучение выходных и передаточных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в зависимости от вариации двух ключевых параметров: эмпирического коэффициента E_b и содержания алюминия в донорном слое AlGaAs. Установлено, что модуляция указанных параметров приводит к изменению концентрации точечных дефектов DX-центров, которые детерминируют формирование локализованных состояний в запрещенной зоне.

Цель работы. Исследование DX-центров в модели AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT в САПР.

Материалы и методы. Методология исследования базировалась на применении численного моделирования, проведенного на основе системы уравнений, описывающей физические процессы в полупроводниках (уравнений Пуассона, непрерывности и переноса). Расчеты выполнялись с привлечением гидродинамической модели, которая интегрирует особенности структур с квантовыми ямами. Верификация модели проводилась на основе экспериментальных структур, изготовленных на АО "Светлана-Рост".

Результаты. Установлено, что исследуемая численная модель pHEMT, учитывающая DX-центры, комплексно описывает такие экспериментальные данные, как напряжение отсечки и ток насыщения. Концентрация DX-центров, определяемая параметрами E_b и молярной долей Al, является критическим фактором, контролирующим плотность носителей заряда в канале. Проведенный анализ ВАХ позволяет использовать модель в качестве точного инструмента для количественной оценки концентрации точечных дефектов (DX-центров) в реальных гетероструктурах.

Заключение. Разработанная численная модель pHEMT адекватно описывает негативное влияние DX-центров на ВАХ транзистора. Полученная в ходе исследования численная модель pHEMT демонстрирует, что концентрация DX-центров существенно влияет на итоговые параметры pHEMT. DX-центры способны динамически управлять концентрацией носителей в канале транзистора и вносить нестабильность в работу прибора. Представленные исследования позволяют минимизировать влияние DX-центров на характеристики pHEMT посредством оптимизации параметров транзистора и эпитаксиального процесса роста гетероструктур.

Ключевые слова: pHEMT, транзистор с высокой подвижностью электронов, GaAs/AlGaAs/InGaAs, TCAD, DX-центры, глубокие донорные ловушки

Для цитирования: Исследование DX-центров в AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT / А. В. Сапожников, Р. С. Крюков, А. И. Баранов, А. Л. Дудин, В. В. Перепеловский // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 70–81.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-70-81

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; принята к публикации после рецензирования 29.01.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

Study of DX centers in AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT

Alexander V. Sapozhnikov^{1,2✉}, Roman S. Kryukov^{1,2}, Artem I. Baranov³,
Anatoliy L. Dudin², Vadim V. Perepelovskiy¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Joint Stock Company "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

³ Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

✉ avsapozhnikov@stud.etu.ru

Abstract

Introduction. A major challenge in AlGaAs-based heterostructure devices is the presence of DX centers in heavily doped *n*-type layers. These deep donor traps degrade the performance of pseudomorphic high electron mobility transistors (pHEMTs). This study examines the influence of DX centers on pHEMT characteristics through a systematic analysis of output and transfer current–voltage characteristics (IVCs) as functions of two key parameters: the empirical binding energy coefficient E_b and the aluminum content in the AlGaAs donor layer. Variations in these parameters modify the concentration of DX centers, which in turn governs the formation of localized states within the band gap.

Aim. To investigate DX centers in an AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT model using technology computer-aided design (TCAD) tools.

Materials and methods. The study employed numerical simulation based on the fundamental semiconductor equations (Poisson, continuity, and transport equations) implemented within a hydrodynamic framework that accounts for quantum-well features. Model validation was carried out using experimental structures fabricated at AO "Svetlana-Rost".

Results. The numerical pHEMT model, which incorporates DX centers, reproduces experimental characteristics, including threshold voltage and saturation current. The DX center concentration, governed by the E_b parameter and the aluminum mole fraction, is a key factor controlling channel charge density. Analysis of the IVCs indicates that the model provides a reliable means of quantitatively evaluating point-defect (DX center) concentrations in real heterostructures.

Conclusion. The developed numerical model captures the adverse impact of DX centers on pHEMT IVCs. The results show that DX center concentration strongly affects final device parameters, modulating channel carrier density and introducing operational instability. These findings offer a basis for reducing the influence of DX centers on pHEMT performance through optimization of transistor design and epitaxial growth conditions.

Keywords: pHEMT, high electron mobility transistor, GaAs/AlGaAs/InGaAs, TCAD, DX centers, deep donor traps

For citation: Sapozhnikov A. V., Kryukov R. S., Baranov A. I., Dudin A. L., Perepelovskiy V. V. Study of DX centers in AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 70–81.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-70-81

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

Submitted 30.09.2025; accepted 29.01.2026; published online 29.06.2026

Введение. Наличие DX-центров в сильно-легированных Si слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, изготовленных на установке молекулярно-лучевой эпитаксии, является существенным препятствием при разработке устройств на основе AlGaAs [1]. В течение длительного времени микроскопическая структура DX-центров оставалась предметом научных дискуссий [2, 3]. Первоначально была выдвинута гипотеза о том, что DX-центры являются комплексом двух де-

фектов: примеси замещения или донора (D) и неизвестного дефекта (X). Однако дальнейшее развитие теоретических представлений о DX-центрах привело к отказу от указанной модели и переходу к более упрощенному описанию.

DX-центры представляют собой сложные точечные дефекты, характеризующиеся значительной отрицательной корреляционной энергией. Они формируются на основе обычных донорных примесей замещения (элементов IV

и VI групп) и способны существовать в различных зарядовых состояниях [2]. В нейтральном состоянии (отсутствие связанного электрона) эти центры имеют положительный заряд и характеризуются малой энергией связи электрона, что наблюдается, например, в GaAs при нормальном давлении. Благодаря сильному взаимодействию с кристаллической решеткой DX-центры создают глубокий энергетический уровень в запрещенной зоне. Стабильным однократно отрицательным зарядовым состоянием, ассоциированным с этим глубоким уровнем, является состояние DX. Прочие зарядовые состояния данных центров соответствуют мелким донорным уровням.

Положение энергетических уровней DX-центров существенно зависит от содержания алюминия в твердом растворе [4–6]. Указанная зависимость обусловлена изменением зонной структуры материала при варьировании содержания алюминия. С увеличением доли алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ наблюдается смещение зоны проводимости в сторону более высоких значений энергии, что приводит к изменению положения DX-центров относительно дна зоны проводимости. При превышении критического значения молярной доли алюминия $x > 0.22$ энергетические уровни DX-центров оказываются ниже дна зоны проводимости, что обуславливает их доминирующее влияние на электронные свойства материала.

С увеличением содержания алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DX-центры начинают функционировать как глубокие ловушки для электронов, что приводит к значительному снижению концентрации свободных носителей заряда [7]. Этот эффект негативно сказывается на производительности электронных устройств, созданных на основе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. В частности, в транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT) наличие глубоких уровней, связанных с DX-центрами, вызывает сдвиги напряжения отсечки в зависимости от температуры устройства, а также нестабильность тока стока [8, 9].

Влияние DX-центров характеризуется сильной зависимостью от температуры: при низких температурах электроны оказываются "замороженными" на DX-уровнях, что приво-

дит к снижению проводимости материала [10]. При повышении температуры электроны могут термически активироваться и возвращаться в зону проводимости, участвуя в процессе переноса заряда. Кроме того, наличие DX-центров может вызывать нестабильность работы устройств при низких температурах и под воздействием освещения. Один из наиболее известных эффектов, связанных с глубокими уровнями, – явление персистентной фотопроводимости [11]. Фотоны могут вызывать переход электронов из DX-уровней в зону проводимости. После прекращения освещения электроны могут оставаться в зоне проводимости в течение длительного времени, что приводит к длительной релаксации проводимости. Эти эффекты вызывают нестабильность работы НЕМТ-устройств при изменении температуры в широком диапазоне, а также при изменении условий освещенности.

Учитывая описанные эффекты, минимизация влияния DX-центров представляет собой важную задачу для улучшения характеристик устройств на основе AlGaAs, что является ключевым аспектом в разработке современных полупроводниковых технологий. Один из эффективных инструментов для решения подобных задач – математическое моделирование, позволяющее детально исследовать физические свойства глубоких донорных уровней и их воздействие на электронные параметры материала. Цель настоящей статьи – представить методику моделирования работы псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) с учетом DX-центров и проанализировать их поведение в различных условиях, включая изменение состава твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, а также вариации параметров энергетических уровней DX-центров.

Математическая модель. Моделирование полупроводниковых приборов выполнялось численными методами с решением фундаментальных уравнений электроники: уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и переноса носителей заряда. В САПР использована гидродинамическая модель, которая может эффективно применяться в контексте субмикронных размеров прибора.

Уравнение Пуассона:

$$\nabla(\varepsilon \nabla \varphi) + \bar{P} = -q(p - n + N_d - N_a) - \rho_{\text{trap}},$$

где ∇ – оператор градиента; ε – диэлектрическая проницаемость; φ – электростатический потенциал; $\bar{P}$ – сегнетоэлектрическая поляризация; q – элементарный электрический заряд; n и p – плотности электронов и дырок соответственно; N_d – концентрация ионизированных доноров; N_a – концентрация ионизированных акцепторов; ρ_{trap} – плотность заряда, создаваемая ловушками и фиксированными зарядами.

Уравнения непрерывности:

$$\begin{aligned} \nabla \bar{J}_n &= qR_{\text{net}, n} + q \frac{\partial n}{\partial t}; \\ -\nabla \bar{J}_p &= qR_{\text{net}, p} + q \frac{\partial p}{\partial t}, \end{aligned}$$

где $\bar{J}_n$, $\bar{J}_p$ – плотности тока для электронов и дырок соответственно; $R_{\text{net}, n}$ и $R_{\text{net}, p}$ – суммарные скорости рекомбинации электронов и дырок соответственно.

Уравнения переноса для гидродинамической модели:

$$\begin{aligned} \bar{J}_n &= \mu_n (n \nabla E_c + kT_n \nabla n - nkT_n \nabla \ln \gamma_n + \\ &\quad + \lambda_n f_n^{\text{td}} kn \nabla T_n - 1.5nkT_n \nabla \ln m_n); \\ \bar{J}_p &= \mu_p (p \nabla E_v - kT_p \nabla p + pkT_p \nabla \ln \gamma_p - \\ &\quad - \lambda_p f_p^{\text{td}} kp \nabla T_p + 1.5pkT_p \nabla \ln m_p), \end{aligned}$$

где μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно; E_c – энергия границы зоны проводимости; E_v – энергия границы валентной зоны; k – постоянная Больцмана; T_n , T_p – электронная и дырочная температуры соответственно; γ_n , γ_p – степени вырождения для электронов и дырок соответственно; λ_n , λ_p – интегралы Ферми порядка 1/2 безразмерной кинетической энергии электрона и дырки соответственно; f_n^{td} , f_p^{td} – константы термодиффузии для электронов и дырок соответственно; m_n , m_p – эффективная масса электронов и дырок соответственно.

Для определения температуры решетки, электронных и дырочных температур в гидродинамической модели используются уравнения энергетического баланса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_n}{\partial t} + \nabla \bar{S}_n &= \bar{J}_n \nabla E_c / q + \frac{dW_n}{dt}; \\ \frac{\partial W_p}{\partial t} + \nabla \bar{S}_p &= \bar{J}_p \nabla E_v / q + \frac{dW_p}{dt}; \\ \frac{\partial W_l}{\partial t} + \nabla \bar{S}_l &= \frac{dW_l}{dt}, \end{aligned}$$

где W_n , W_p и W_l – плотности энергии электронов, дырок и решетки соответственно; S_n , S_p и S_l – потоки энергии электронов, дырок и решетки соответственно.

При моделировании AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT n -типа учитывались только электронные процессы, поскольку вклад дырок в общую картину пренебрежимо мал [12]. Обозначения соответствуют общепринятой системе, приведенной в [12, 13]. Данный подход обеспечивает точное прогнозирование поведения полупроводниковых приборов в различных условиях эксплуатации.

Анализ параметров выполнялся в САПР, поддерживающей многопараметрическое моделирование полупроводниковых приборов [14].

Конструкция прибора включает многослойную эпитаксиальную гетероструктуру. Параметры слоев исследуемой структуры pHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs систематизированы в таблице.

Численный анализ в САПР включает учет ключевых физических явлений в модели pHEMT АО "Светлана-Рост". Эффекты двумерного электронного газа (2DEG) включены в модель в соответствии с [15]. Нелинейность переноса электронов и дырок в сильных полях управляется через механизмы фононного рассеяния. Особое внимание уделено глубоким донорным ловушкам в слоях AlGaAs. Модель включает молярный состав тройных твердых растворов AlGaAs и InGaAs.

Изменение энергии носителей заряда при рекомбинационных процессах реализуется через диссипацию энергии в кристаллической решетке или ее трансформацию в другие формы энергии.

При математическом моделировании pHEMT критически важен точный учет всех

Данные структуры: GaAs pHEMT switch
Structure data: AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT switch

Последовательность слоев	Толщина слоя, мкм	Тип легирования, концентрация, см ⁻³
Si ₃ N ₄	$3 \cdot 10^{-2}$	–
GaAs	$5 \cdot 10^{-2}$	<i>n</i> , $3.5 \cdot 10^{18}$
GaAs	$2 \cdot 10^{-2}$	<i>n</i> , $2.0 \cdot 10^{17}$
AlGaAs	$2.5 \cdot 10^{-3}$	<i>n</i> , $3.9 \cdot 10^{18}$
GaAs	$5 \cdot 10^{-3}$	<i>n</i> , $1.2 \cdot 10^{17}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$1.75 \cdot 10^{-2}$	<i>n</i> , $1.2 \cdot 10^{17}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$1.25 \cdot 10^{-2}$	<i>n</i> , $3.4 \cdot 10^{18}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As	$3 \cdot 10^{-3}$	–
In _{0.22} Ga _{0.78} As	$1.2 \cdot 10^{-2}$	–
GaAs	0.8	–
GaAs	Подложка, нелегированный полупроводник с ориентацией (100), диаметром 100 ± 0.4 мм, толщина 620 ± 30 мкм	

ключевых механизмов рекомбинации носителей заряда. В расчетной схеме использованы физические модели, комплексно описывающие 3 основных канала потери носителей: излучательную рекомбинацию, при которой электрон и дырка напрямую рекомбинируют с испусканием фотона; рекомбинацию по Шокли–Риду–Холлу, протекающую через ловушки в запрещенной зоне полупроводника; Оже-рекомбинацию, которая представляет безызлучательный процесс, при котором энергия, высвобождаемая при рекомбинации одной пары электрон–дырка, передается третьему носителю в виде кинетической энергии, что особенно важно учитывать при высоких концентрациях носителей. Достоверность выбранного подхода подтверждена соответствием результатов моделирования экспериментальным вольт-амперным характеристикам (ВАХ) [16]. Моделирование с использованием указанных механизмов позволяет с высокой точностью предсказывать не только статические ВАХ, но и такие критические характеристики, как подвижность носителей в канале (напрямую влияющая на быстродействие прибора), что существенно сокращает время и стоимость цикла разработки.

Для обеспечения точности численного моделирования область pHEMT была разбита на адаптивную сетку, содержащую приблизительно 58 000 узлов. Ключевой особенностью являлось локальное сгущение сетки в канале транзистора – области, где сосредоточен основной по-

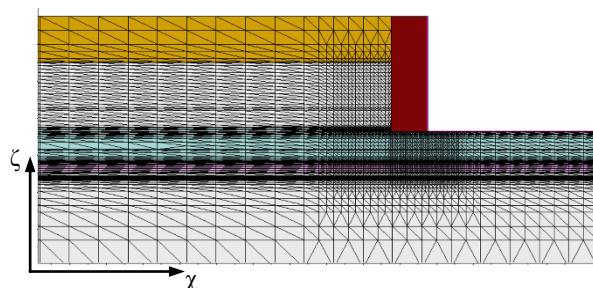


Рис. 1. Изображение адаптивной сетки на двумерном срезе модели AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT

Fig. 1. Adaptive mesh on a two-dimensional cross-section of the AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT model

ток носителей заряда и наблюдаются наибольшие градиенты электрического поля и концентраций. Для корректного разрешения этих величин было задано высокое пространственное разрешение в области канала InGaAs в двумерном разрезе модели pHEMT (рис. 1): 10 узлов на каждые 10 нм по горизонтальной оси χ и шаг 4 нм по вертикальной оси ζ в двумерном пространстве модели. Такая детализация критически важна для точного расчета скоростных характеристик и подвижности электронов.

В настоящей статье представлены результаты детального анализа влияния глубоких донорных ловушек DX-центров на параметры и производительность структуры pHEMT. Основу анализа составила универсальная теоретическая модель описания DX-центров [17], которая учитывает их природу как дефектов с отрицательной корреляционной энергией и зависимость параметров от молярной доли алюми-

ния и уровня легирования. Ее положения были дополнены экспериментальными данными с производства АО "Светлана-Рост", полученными двумя независимыми методами: нестационарной спектроскопией и измерением ВАХ реальных структур рНЕМТ.

Далее по тексту молярная доля алюминия в растворе AlGaAs донорного слоя обозначается как x_{Al} , а эмпирический коэффициент, определяющий энергию связи DX-центров в тройном растворе AlGaAs донорного слоя, – как E_b , концентрация DX-центров – как N_{DX} .

Метод расчета N_{DX} в структурах GaAs рНЕМТ опирается на принципы, изложенные в [17–19]. Согласно результатам DLTS-анализа экспериментальных образцов рНЕМТ AlGaAs/InGaAs/GaAs производства АО "Светлана-Рост", при молярной доле алюминия $x_{Al} = 0.22$ в донорном слое AlGaAs значение N_{DX} достигает $1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. DLTS позволяет получить энергетический спектр, концентрацию и сечения захвата DX-центров. Фундаментальным параметром универсальной модели DX-центров выступает эмпирический коэффициент E_b , который в пределах погрешности измерений допустимо трактовать в качестве универсального параметра, определяющего энергию связи DX-центров в тройных и четверных соединениях на основе цинковой обманки [17].

Представленное исследование проводилось в двух основных направлениях. В первом случае коэффициент E_b изменялся в интервале 0.1...0.2 эВ с дискретностью 0.01 эВ при постоянном значении $x_{Al} = 0.22$. Для всех значений E_b выполнено моделирование в САПР выходных и передаточных ВАХ. Во втором случае изучалась зависимость характеристик от состава твердого раствора при вариации x_{Al} от 0.15 до 0.30 с шагом 0.01 и фиксированном $E_b = 0.14$ эВ. Для каждого значения x_{Al} проводился расчет стоковых и сток-затворных ВАХ. Характеристики использованных материалов и сплавов приведены в [20].

В результате моделирования установлены диапазоны N_{DX} : $1.98 \cdot 10^{16} \dots 1.16 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

для вариации $x_{Al} = 0.15 \dots 0.22$ и $1.70 \cdot 10^{17} \dots 1.01 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для $x_{Al} = 0.23 \dots 0.3$. При вариации E_b в пределах 0.10...0.14 эВ установлен диапазон N_{DX} $2.95 \cdot 10^{16} \dots 1.16 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в пределах 0.15...0.20 эВ N_{DX} $1.88 \cdot 10^{17} \dots 1.08 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Важным этапом работы стало сопоставление данных двумерного численного моделирования ВАХ с экспериментальными результатами, предоставленными производственным комплексом АО "Светлана-Рост". Проводилось также сопоставление численных характеристик модели при разных N_{DX} и вариациях x_{Al} и E_b .

Результаты исследования. Проведено детальное исследование влияния глубоких донорных ловушек (DX-центров) на характеристики псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs. Методы исследования базировались на сопоставлении данных численного моделирования с экспериментальными результатами, полученными на реальных технологических образцах АО "Светлана-Рост" с идентичной топологией.

В качестве базовой численной модели использовалась структура с молярной долей алюминия в донорном слое $x_{Al} = 0.22$ и эмпирическим коэффициентом (характеризующим энергию связи) $E_b = 0.14$ эВ, что соответствует рассчитанной концентрации DX-центров $1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Указанное значение концентрации было независимо подтверждено экспериментальным методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней, что верифицировало корректность исходных параметров модели. На стоковых и сток-затворных зависимостях ток стока обозначен I_d , напряжение сток–исток U_{d-s} , напряжение затвора U_g .

Сравнительный анализ стоковых (рис. 2, а) и сток-затворных (рис. 2, б) ВАХ показал высокую степень соответствия между численным моделированием и экспериментом. На рис. 2, а, б приведены области размещения экспериментальных кривых для разных рНЕМТ, расположенных на одной пластине и имеющих единую

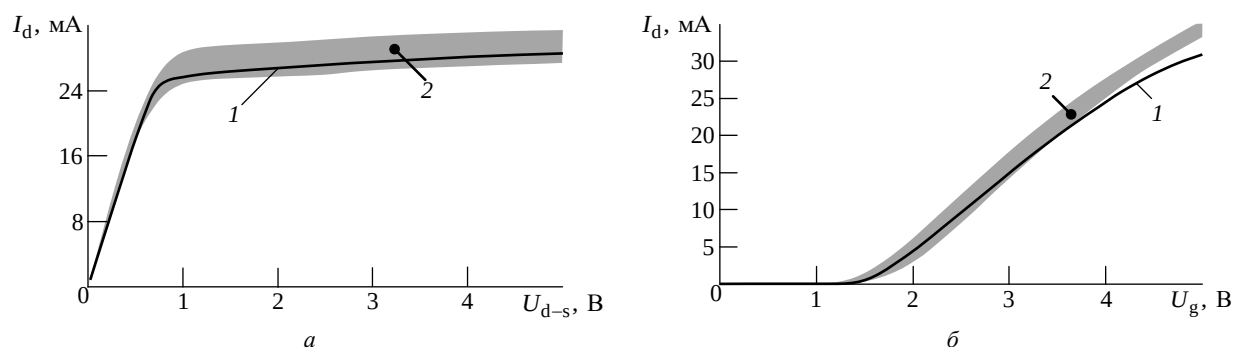


Рис. 2. Сравнительный анализ выходных (а) и передаточных (б) ВАХ рНЕМТ-структур, полученных в результате численного моделирования и экспериментальных измерений: 1 – зависимость, полученная на основе численной модели, учитывающей влияние глубоких DX-центров; 2 – область экспериментально снятых характеристик

Fig. 2. Comparison of output (a) and transfer (b) IVCs obtained by numerical simulation and experimental measurement: 1 – numerical model including deep DX centers; 2 – characteristics measured experimentally

топологию (2). Для модели с учетом DX-центров (1) были получены следующие ключевые параметры: ток насыщения стока составил 28.62 мА, напряжение отсечки –1.3 В. Эти значения находятся в пределах экспериментальных разбросов, зафиксированных для партии образцов на производстве: ток насыщения варьировался от 27.40 до 31.55 мА, а напряжение отсечки – от –1.39 до –1.18 В. Установленное соответствие подтверждает адекватность физической модели, корректно описывающей влияние DX-центров на ток в канале транзистора.

Исследованы стоковые (рис. 3, а) и сток-затворные (рис. 3, б) ВАХ при варьировании эмпирического коэффициента E_b . Анализ влияния энергии связи E_b показал, что в диапазоне 0.1...0.13 эВ влияние ловушек незначительно: ток насыщения снижался лишь на

1.2...3.0 % относительно базового значения. Однако при увеличении E_b свыше 0.15 эВ начинается выраженная деградация характеристик. Наиболее резкое падение тока насыщения (до 19.4 мА, что на 32.2 % ниже базового значения) наблюдается при значениях $E_b = 0.17...0.20$ эВ, что коррелирует с экспоненциальным ростом концентрации ловушек. Одновременно при $E_b \geq 0.15$ эВ фиксируется смещение напряжения отсечки в область более отрицательных значений (до –1.38 В), что свидетельствует о возрастающем истощении двумерного электронного газа из-за захвата носителей на глубокие уровни.

Исследованы стоковые (рис. 4, а) и сток-затворные (рис. 4, б) ВАХ, полученные при систематическом изменении молярной доли алюминия в трехкомпонентном растворе

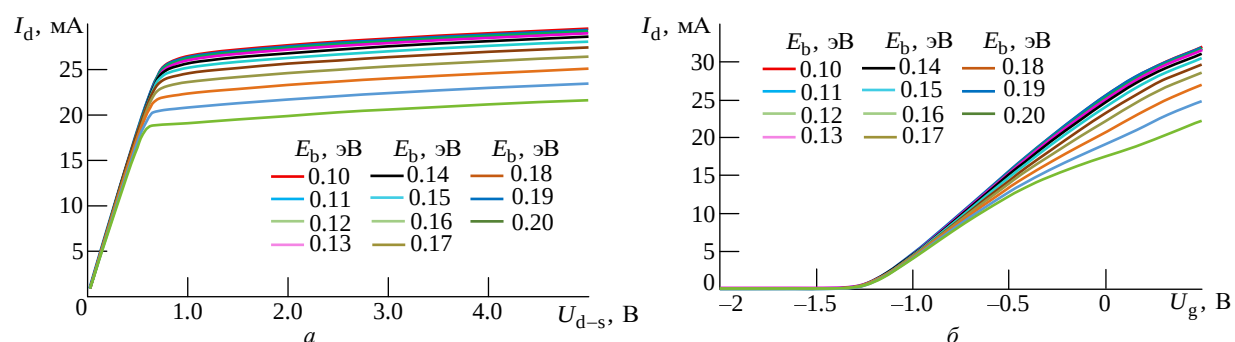


Рис. 3. Влияние эмпирического энергетического параметра E_b на выходные (а) и передаточные (б) характеристики рНЕМТ-структур. Результаты получены при фиксированной молярной доле алюминия ($x = 0.22$) в легирующем слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Fig. 3. Influence of the empirical energy parameter E_b on the output (a) and transfer (b) characteristics of pHEMT structures. Results are shown for a fixed aluminum mole fraction ($x = 0.22$) in the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ donor layer

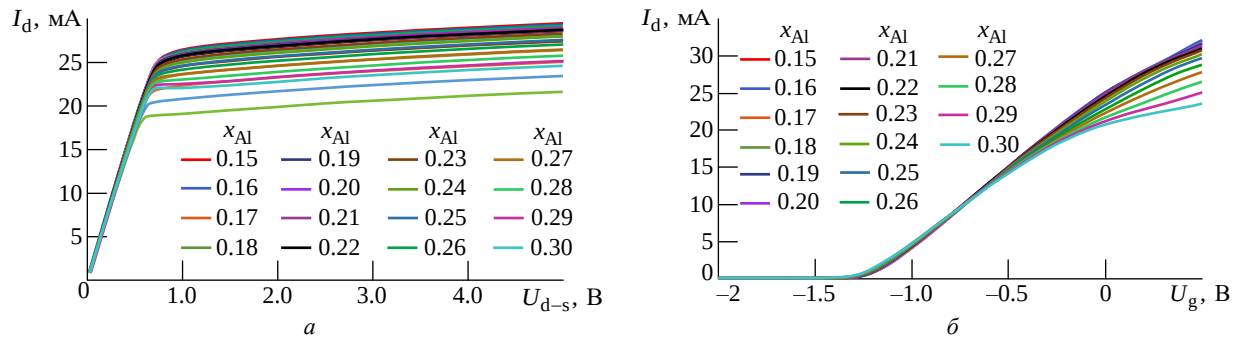


Рис. 4. Влияние молярной доли алюминия x_{Al} в донорном слое AlGaAs на выходные (а) и передаточные (б) характеристики pHEMT. Приведены результаты численного моделирования при коэффициенте энергии связи $E_b = 0.14$ эВ

Fig. 4. Influence of the aluminum mole fraction x_{Al} in the AlGaAs donor layer on the output (a) and transfer (b) characteristics of the pHEMT. Numerical simulation results are presented for a fixed binding energy coefficient $E_b = 0.14$ eV

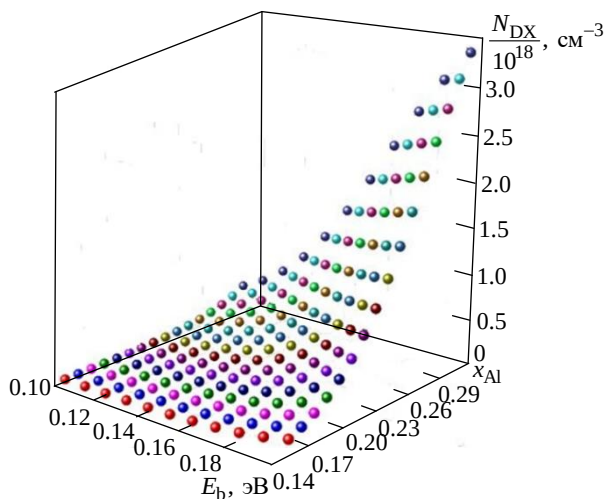


Рис. 5. Зависимость концентрации DX-центров N_{DX} от доли Al донорного слоя x_{Al} и коэффициента энергии связи E_b в AlGaAs

Fig. 5. Concentration of DX centers N_{DX} as a function of the aluminum mole fraction x_{Al} in the AlGaAs donor layer and the binding energy coefficient E_b

AlGaAs в диапазоне от 0.15 до 0.30 с шагом 0.01 при фиксированном значении эмпирического коэффициента $E_b = 0.14$ эВ. Анализ зависимостей выявил нелинейный характер влияния x_{Al} на характеристики pHEMT. В пределах $x_{Al} = 0.15 \dots 0.21$ параметры транзистора оставались стабильными с отклонением тока насыщения не более 0.8 %. При дальнейшем увеличении содержания алюминия свыше 0.22 наблюдается существенное снижение производительности: при $x_{Al} = 0.3$ ток насыщения падает до 24.0 мА (отклонение на 15.9 %), а

напряжение отсечки смещается до -1.37 В. Это связано с тем, что вероятность образования стабильных DX-центров резко возрастает с увеличением x_{Al} в твердом растворе AlGaAs.

Для определения характера зависимости концентрации DX-центров N_{DX} от содержания алюминия в твердом растворе AlGaAs x_{Al} и от энергии связи представлена графическая зависимость (рис. 5). Анализ графика выявил экспоненциальную зависимость концентрации DX-центров от E_b и x_{Al} . Максимальная концентрация глубоких донорных состояний (DX-центров) зафиксирована при значениях $E_b = 0.2$ эВ и $x_{Al} = 0.30$, которой соответствует верхний символ на рис. 5.

Заключение. Разработана численная модель, описывающая воздействие глубоких донорных ловушек (DX-центров) на электрофизические свойства гетероструктурных pHEMT на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs. Ключевым фактором, определяющим электрофизические характеристики транзистора, выступает концентрация DX-центров N_{DX} , функционально зависящая от коэффициента энергии связи E_b и молярной доли алюминия x_{Al} в донорном слое $Al_xGa_{1-x}As$.

Аттестация модели, выполненная при $E_b = 0.14$ эВ и $x_{Al} = 0.22$, продемонстрировала соответствие смоделированной и экспериментальной концентраций DX-центров. Анализ выявил доминирующую роль концентрации DX-центров N_{DX} , модулируемой параметрами

E_b и x_{Al} , в формировании локализованных состояний и, как следствие, функциональности устройства. Систематическое изменение E_b и x_{Al} индуцирует выраженные изменения ВАХ.

Сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ pHEMT подтвердило адекватность модели. Исходная модель с $x_{Al} = 0.22$ и $E_b = 0.14$ эВ ($N_{DX} \sim 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) показала хорошее количественное совпадение с данными измерений. Исследование выявило нелинейное влияние параметров материала. Ток насыщения остается стабильным (~ 28.8 мА) при $x_{Al} \leq 0.21$, но снижается на 15.9 % (до 24.0 мА) при $x_{Al} = 0.3$. Аналогично, при $E_b \leq 0.13$ эВ падение тока незначительно, однако при $E_b = 0.2$ эВ наблюдается резкая деградация: ток уменьшается на 32.2 % (до 19.4 мА). Напряжение отсечки демонстрирует

сходную зависимость: оно стабильно (-1.3 В) в центральных диапазонах $x_{Al} = 0.19 \dots 0.22$ и $E_b = 0.1 \dots 0.14$ эВ, но смещается в область более отрицательных значений (до -1.37 и -1.38 В соответственно) при выходе за эти пределы. Полученные зависимости определяют, что для минимизации влияния DX-центров необходимо контролировать как состав x_{Al} , так и уровень легирования, определяющий энергию связи E_b .

Интерпретация расчетных ВАХ предоставляет методологию для количественного определения концентрации DX-центров в реальных pHEMT. Полученные корреляции концентрационных зависимостей позволяют оптимизировать эпитаксиальный рост и геометрию транзисторов с целью минимизации деградирующего влияния DX-центров на рабочие параметры, повышая тем самым выход годных изделий.

Авторский вклад

Сапожников Александр Владимирович – проектирование численной модели в среде TCAD; анализ экспериментальных данных.

Крюков Роман Сергеевич – литературный обзор, систематизация экспериментальных данных.

Баранов Артем Игоревич – DLTS-анализ.

Дудин Анатолий Леонидович – рекомендации по процессу моделирования дефектов и ловушек pHEMT в TCAD; обсуждение результатов.

Перепеловский Вадим Всеволодович – постановка задачи; рекомендации по процессу моделирования в TCAD, обсуждение результатов.

Author's contribution

Alexander V. Sapozhnikov, design of the numerical model in the TCAD environment; analysis of experimental data.

Roman S. Kryukov, literature review and systematization of experimental data.

Artem I. Baranov, DLTS analysis

Anatoliy L. Dudin, recommendations on the process of pHEMT modeling in TCAD; discussion of the results.

Vadim V. Perepelovskiy, problem statement; recommendations on the process of pHEMT modeling in TCAD; discussion of the results.

Список литературы

1. Mooney P. M. DX centers in III-V alloys: recent developments // Deep Centers in Semiconductors. 2024. P. 643–665.

2. Chadi D. J., Chang K. J. Theory of the atomic and electronic structure of DX centers in GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ alloys // Phys. review let. 1988. Vol. 61, iss. 7. Art. № 873.
doi: 10.1103/PhysRevLett.61.873

3. Chadi D. J., Zhang S. B. Atomic structure of DX centers: Theory // J. of electronic materials. 1991. Vol. 20. P. 55–58.
doi: 10.1007/BF02651965

4. Mooney P. M. Electrical properties of DX centers in GaAs and AlGaAs // Radiation Effects and Defects in Solids. 1989. Vol. 111–112, iss. 1–2. P. 281–298.
doi: 10.1080/10420158908213003

5. Sato T., Ishiwatari T. Deep levels in strongly Si-compensated GaAs and AlGaAs // J. of Applied Physics. 2002. Vol. 91, № 8. P. 5158–5162.
doi: 10.1063/1.1462847

6. MBE growth of ultra-low disorder 2DEG with mobility exceeding $35 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ / V. Umansky, M. Heiblum, Y. Levinson, J. Smet, J. Nübler, M. Dolev // J. of Crystal Growth. 2009. Vol. 311, № 7. P. 1658–1661.
doi: 10.1016/j.jcrysgro.2008.09.151

7. Optimized $Al_{0.25}Ga_{0.75}$ as solar cell performance using a new approach based on hybridizing Silvaco TCAD simulator with real coded genetic algorithm / H. Chabane, L. Dehimi, H. Bencherif, S. Rao, A. Benhaya, N. Guenifi, P. Sasikumar, Z. Younsi, S. H. Shahatha, M. R. Mohammad, N. H. Alotaibi, R. Haldhar, M. K. Hossain // J. of Optics. 2024. Vol. 54. P. 2785–2800.
doi: 10.1007/s12596-024-01969-w

8. Room-temperature electron trapping in $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ modulation-doped field-effect transistors / M. I. Nathan, P. M. Mooney, P. M. Solomon, S. L. Wright // *Appl. Physics Let.* 1985. Vol. 47, iss. 6. P. 628–630.
doi: 10.1063/1.96095

9. Yatabe Z., Asubar J. T., Hashizume T. Insulated gate and surface passivation structures for GaN-based power transistors // *J. of Physics D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49, № 39. Art. № 393001.
doi: 10.1088/0022-3727/49/39/393001

10. Hot-electron capture to DX centers in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ at low Al mole fractions ($x < 0.2$) / T. N. Theis, B. D. Parker, P. M. Solomon, S. L. Wright // *Appl. Physics Let.* 1986. Vol. 49(22). P. 1542–1544.
doi: 10.1063/1.97276

11. Lang D. V., Logan R. A., Jaros M. Trapping characteristics and a donor-complex (DX) model for the persistent-photoconductivity trapping center in Te-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ // *Physical Review B.* 1979. Vol. 19, iss. 2. Art. № 1015.
doi: 10.1103/PhysRevB.19.1015

12. Численный анализ $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ pHEMT / А. В. Сапожников, И. С. Пушница, А. Л. Дудин, В. В. Перепеловский // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2025. Т. 28, № 3. С. 116–128.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-116-128

13. SenteraTM Device User Guide. Ver. T-2022. 03. URL: <https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html> (дата обращения: 12.09.2024).

14. Коловский Ю. В., Левицкий А. А., Мариушкин П. С. Компьютерное моделирование ком-

понентов МЭМС // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС).* 2008. № 1. С. 398–401.

15. Mixed-dimensional 1D/2D van der Waals heterojunction diodes and transistors in the atomic limit / J. Jadwiszczak, J. Sherman, D. Lynall, Y. Liu, B. Penkov, E. Young, R. Keneipp, M. Drndić, J. C. Hone, K. L. Shepard // *ACS nano.* 2022. Vol. 16, № 1. P. 1639–1648.
doi: 10.1021/acsnano.1c10524

16. Influence of double $\text{InGaAs}/\text{InAs}$ channel on DC and RF performances of InP -based HEMTs / H. L. Hao, M. Y. Su, H. T. Wu, H. Y. Mei, R. X. Yao, F. Liu, S. X. Sun // *J. of Ovonic Research.* 2022. Vol. 18, № 3. P. 411–419.
doi: 10.15251/JOR.2022.183.411

17. Karpov S. Y. A Universal Model for DX-Center Binding Energy in Cubic III–V Compounds // *Physica status solidi (b).* 2021. Vol. 258, № 5. Art. № 2000596.
doi: 10.1002/pssb.202000596

18. A simple calculation of the DX center concentration based on an L-donor model / M. Tachikawa, M. Mizuta, H. Kukimoto, S. Minomura // *Japanese J. of Appl. Phys.* 1985. Vol. 24, № 10A. Art. № L821.
doi: 10.1143/JJAP.24.L821

19. Hybrid functional calculations of DX centers in AlN and GaN / L. Gordon, J. L. Lyons, A. Janotti, C. G. Van de Walle // *Physical Review B.* 2014. Vol. 89, № 8. Art. № 085204.
doi: 10.1103/PhysRevB.89.085204

20. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 400 p.

Информация об авторах

Сапожников Александр Владимирович – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2023, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер АО "Светлана-Рост". Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ; моделирование приборов твердотельной электроники; HEMT.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: avsapozhnikov@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-5106-4428>

Крюков Роман Сергеевич – магистр по направлению "Нанотехнологии и микросистемная техника" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер АО "Светлана-Рост". Автор десяти научных публикаций. Сфера интересов – СВЧ; технология и моделирование полупроводниковых приборов; HEMT; QWIP.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: r.kryukov@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0006-9912-3490>

Баранов Артем Игоревич – кандидат физико-математических наук (2018), младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета им. Ж. И. Алфёрова Российской академии наук. Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – исследование фотоэлектрических и электрофизических свойств и моделирование солнечных элементов; изучение дефектных уровней в новых материалах и различных интерфейсов.

Адрес: Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, ул. Хлопина, д. 8/3, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: baranov_art@spbau.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>

Дудин Анатолий Леонидович – специалист в области физики и технологии полупроводниковых приборов (1996, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), заместитель генерального директора по производству и технологическим разработкам АО "Светлана-Рост". Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – СВЧ; технология полупроводниковых приборов; НЕМТ.

Адрес: АО "Светлана-Рост", пр. Энгельса, д. 27, Санкт-Петербург, 194156, Россия

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Перепеловский Вадим Всеволодович – кандидат физико-математических наук (1992), доцент (1995) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

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

E-mail: vvperepelovsky@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-2622-4567>

References

1. Mooney P. M. DX Centers in III-V Alloys: Recent Developments. Deep Centers in Semiconductors. 2024, pp. 643–665.
2. Chadi D. J., Chang K. J. Theory of the Atomic and Electronic Structure of DX Centers in GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Alloys. Phys. Review Lett. 1988, vol. 61, iss. 7, art. no. 873.
doi: 10.1103/PhysRevLett.61.873
3. Chadi D. J., Zhang S. B. Atomic Structure of DX Centers: Theory. J. of Electronic Materials. 1991, vol. 20, pp. 55–58.
doi: 10.1007/BF02651965
4. Mooney P. M. Electrical Properties of DX Centers in GaAs and AlGaAs. Radiation Effects and Defects in Solids. 1989, vol. 111–112, iss. 1–2, pp. 281–298.
doi: 10.1080/10420158908213003
5. Sato T., Ishiwatari T. Deep Levels in Strongly Si-Compensated GaAs and AlGaAs. J. of Applied Physics. 2002, vol. 91, no. 8, pp. 5158–5162.
doi: 10.1063/1.1462847
6. Umansky V., Heiblum M., Levinson Y., Smet J., Nübler J., Dolev M. MBE Growth of Ultra-Low Disorder 2DEG with Mobility Exceeding $35 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. J. of Crystal Growth. 2009, vol. 311, no. 7, pp. 1658–1661.
doi: 10.1016/j.jcrysgro.2008.09.151
7. Chabane H., Dehimi L., Bencherif H., Rao S., Benhaya A., Guenifi N., Sasikumar P., Younsi Z., Shaha-tha S. H., Mohammad M. R., Alotaibi N. H., Haldhar R., Hossain M. K. Optimized $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ as Solar Cell Performance Using a New Approach Based on Hybridizing Silvaco TCAD Simulator with Real Coded Genetic Algorithm. J. of Optics. 2024, vol. 54, pp. 2785–2800.
doi: 10.1007/s12596-024-01969-w
8. Nathan M. I., Mooney P. M., Solomon P. M., Wright S. L. Room-Temperature Electron Trapping in $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ Modulation-Doped Field-Effect Transistors. Appl. Physics Lett. 1985, vol. 47, iss. 6, pp. 628–630.
doi: 10.1063/1.96095
9. Yatabe Z., Asubar J. T., Hashizume T. Insulated Gate and Surface Passivation Structures for GaN-Based Power Transistors. J. of Physics D: Appl. Phys. 2016, vol. 49, no. 39, art. no. 393001.
doi: 10.1088/0022-3727/49/39/393001
10. Theis T. N., Parker B. D., Solomon P. M., Wright S. L. Hot-Electron Capture to DX Centers in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ at Low Al Mole Fractions ($x < 0.2$). Appl. Phys. Lett. 1986, vol. 49 (22), pp. 1542–1544.
doi: 10.1063/1.97276
11. Lang D. V., Logan R. A., Jaros M. Trapping Characteristics and a Donor-Complex (DX) Model for the Persistent-Photoconductivity Trapping Center in Te-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Phys. Review B. 1979, vol. 19, iss. 2, art. no. 1015.
doi: 10.1103/PhysRevB.19.1015
12. Sapozhnikov A. V., Pushnitsa I. S., Dudin A. L., Perepelovskiy V. V. Numerical Analysis of Al-GaAs/InGaAs/GaAs pHEMT. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 116–128. (In Russ.)
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-116-128
13. SentaurusTM Device User Guide. Ver. T-2022. 03. Available at: <https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html> (accessed: 12.09.2024).
14. Kolovskii Yu. V., Levitskii A. A., Marinushkin P. S. Computer Modeling of MEMS Components. Problems of Developing Promising Micro- And Nanoelectronic Systems. 2008, no. 1, pp. 398–401. (In Russ.)
15. Jadwiszczak J., Sherman J., Lynall D., Liu Y., Penkov B., Young E., Keneipp R., Drndić M., Hone J. C., Shepard K. L. Mixed-Dimensional 1D/2D van der Waals Heterojunction Diodes and Transistors in the Atomic Limit. ACS Nano. 2022, vol. 16, no. 1, pp. 1639–1648.
doi: 10.1021/acsnano.1c10524
16. Hao H. L., Su M. Y., Wu H. T., Mei H. Y., Yao R. X., Liu F., Sun S. X. Influence of Double InGaAs/InAs Channel on DC and RF Performances of InP-based HEMTs. J. of Ovonic Research. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 411–419.
doi: 10.15251/JOR.2022.183.411

17. Karpov S. Y. A Universal Model for DX-Center Binding Energy in Cubic III–V Compounds. *Physica status solidi (b)*. 2021, vol. 258, no. 5, art. no. 2000596. doi: 10.1002/pssb.202000596

18. Tachikawa M., Mizuta M., Kukimoto H., Minomura S. A simple Calculation of the DX Center Concentration Based on an L-Donor Model. *Japanese J. of Appl. Phys.* 1985, vol. 24, no. 10, art. no. L821. doi: 10.1143 /JJAP.24.L821

19. Gordon L., Lyons J. L., Janotti A., Van de Walle C. G. Hybrid Functional Calculations of DX Centers in AlN and GaN. *Phys. Review B*. 2014, vol. 89, no. 8, art. no. 085204. doi: 10.1103/PhysRevB.89.085204

20. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2009, 400 p.

Information about the authors

Alexander V. Sapozhnikov, Master's degree in Electronics and nanoelectronics (2023, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of JSC "Svetlana-Rost". The author of 4 scientific publications. Area of expertise: microwave; modeling of solid-state electronics devices; HEMT.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: avsapozhnikov@stud.etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-5106-4428>

Roman S. Kryukov, Master's degree in Nanotechnology and microsystems engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Engineer at JSC "Svetlana-Rost". The author of 10 scientific publications. Area of interest: microwave; technology and modeling of semiconductor devices; HEMT; QWIP.

Address: JSC "Svetlana-Rost", Engels Ave., 27, St Petersburg 194156, Russia

E-mail: r.kryukov@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0006-9912-3490>

Artem I. Baranov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2018), Junior Researcher of the Laboratory of Renewable Energy Sources of Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences. The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: study of photovoltaic and electrophysical properties; modeling of solar cells; investigation of defect levels in novel materials and various interfaces.

Address: Alferov Federal State Budgetary Institution of Higher Education and Science Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, 8/3, Khlopina St., St Petersburg 194021, Russia

E-mail: baranov_art@spbau.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4894-6503>

Anatoliy L. Dudin, Specialist in physics and technology of semiconductor devices (1996, Saint Petersburg Electrotechnical University), Chief Technologist of JSC "Svetlana-Rost" The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: microwave; technology of semiconductor devices; HEMT.

Address: JSC "Svetlana-Rost", 27, Engelsa Ave., St Petersburg 194156, Russia

E-mail: a.dudin@svrost.ru

<https://orcid.org/0009-0007-2005-4304>

Vadim V. Perepelovskiy, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1992), Associate Professor (1995) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: simulation of solid-state electronics devices.

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

E-mail: vvperepelovsky@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-2622-4567>

Поляризационный нанокompозит на основе шунгита для задач фотоники: способ упрочнения

Л. О. Федорова^{1,2✉}, Н. В. Каманина^{1,2,3}

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

²Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Гатчина, Россия

³АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова",
Санкт-Петербург, Россия

✉ loresafyoct@gmail.com

Аннотация

Введение. Поливинилспиртовые пленки являются неотъемлемой частью гибкой электроники, биосенсоров и жидкокристаллических элементов. Как и многие полимерные материалы, поливинилспиртовые пленки обладают относительно невысокими значениями механической прочности, что вынуждает производителей электронных и оптических компонентов использовать дополнительные защитные слои, которые, в свою очередь, могут ухудшать эффективность работы компонентов в системе. Один из известных способов управления физическими и химическими свойствами материалов – это их сенсбилизация наночастицами различной природы. В описываемой работе в качестве сенсбилизатора были выбраны наночастицы шунгита, так как этот природный нетоксичный материал широко известен своей упрочняющей способностью.

Цель работы. Получение поливинилспиртовых пленок, сенсбилизированных наночастицами шунгита. Исследование их спектральных и прочностных характеристик в зависимости от технологических параметров синтеза. Определение значений технологических параметров, при которых будет соблюдаться баланс между оптическими и механическими характеристиками.

Материалы и методы. Пленки синтезировались по технологии, разработанной в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова. В качестве полимерной матрицы для создания композитного материала использовался поливиниловый спирт, в качестве наполнителя – наночастицы карельского шунгита с 30 %-м содержанием углерода. Спектральные характеристики пленок исследовались с помощью спектрофотометра УФ-3200, а прочностные характеристики определялись с помощью измерителя микротвердости ПМТ-3М производства АО "ЛОМО".

Результаты. Полученные пленки без дополнительной ламинирующей обработки обладают степенью поляризации более 90 % во всем видимом диапазоне спектра. Наночастицы шунгита способствуют увеличению прочности поливинилспиртовых пленок до 1.6 раз.

Заключение. Для современных устройств фотоники требуются материалы, сочетающие высокую поляризационную и пропускную способность с механической устойчивостью. Разработан эффективный способ улучшения прочности поливинилспиртовых поляризационных пленок с сохранением их оптических свойств, что расширило представление о регулировании механических свойств нанокompозитов.

Ключевые слова: поляризаторы, поливиниловый спирт, шунгит, нанокompозит, микротвердость, модуль Юнга

Для цитирования: Федорова Л. О., Каманина Н. В. Поляризационный нанокompозит на основе шунгита для задач фотоники: способ упрочнения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 82–98.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-82-98

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 24-23-00021 (https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021).

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; принята к публикации после рецензирования 02.02.2026; опубликована онлайн 29.06.2026

Strengthened PVA Polarizing Films Sensitized with Shungite Nanoparticles

Larisa O. Fedorova^{1,2}✉, Natalia V. Kamanina^{1,2,3}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute", Gatchina, Russia

³JSC S. I. Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, Russia

✉ loresafyoc@gmail.com

Abstract

Introduction. Polyvinyl alcohol (PVA) films are widely used in flexible electronics, biosensors, and liquid-crystal optical elements. Like many polymer materials, these films exhibit relatively low mechanical strength, which often necessitates additional protective layers that may reduce the efficiency of electronic and optical components. Sensitization with various nanoparticles is a well-established strategy for tuning the physical and chemical properties of polymer systems. In this study, shungite nanoparticles were selected as a sensitizer, as this natural, nontoxic carbon-containing material is known to enhance mechanical strength.

Aim. To obtain PVA films sensitized with shungite nanoparticles; to investigate their spectral and mechanical characteristics as functions of synthesis parameters; and to identify processing conditions that provide an optimal balance between optical performance and mechanical stability.

Materials and methods. Films were synthesized using the method developed at the S. I. Vavilov State Optical Institute. PVA served as the polymer matrix, and Karelian shungite nanoparticles containing 30 % carbon were introduced as a filler. Spectral characteristics were measured with a UV-3200 spectrophotometer, and mechanical properties were evaluated using a PMT-3M microhardness tester (LOMO).

Results. The films exhibited a polarization degree exceeding 90 % across the visible spectral range without additional lamination. Incorporation of shungite nanoparticles increased the mechanical strength of PVA films by up to 1.6-fold.

Conclusion. Modern photonic devices require materials that combine high polarization efficiency and optical transmittance with mechanical robustness. The developed approach strengthens PVA polarizing films while preserving their optical properties, thereby expanding current understanding of mechanical-property control in nanocomposite systems.

Keywords: polarizers, polyvinyl alcohol, shungite, nanocomposite, microhardness, Young's modulus

For citation: Fedorova L. O., Kamanina N. V. Strengthened PVA Polarizing Films Sensitized with Shungite Nanoparticles. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 82–98.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-82-98

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

Source of funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project № 24-23-00021 (https://rscf.ru/prjcard_int?24-23-00021).

Submitted 01.12.2025; accepted 02.02.2026; published online 29.06.2026

Введение. Оптические поляризаторы, т. е. элементы, способные выделять колебания электрического вектора световой волны определенного направления, широко применяются как в быту [1–3], так и в передовых научных исследованиях и технике [4–6]. Линейные поляризаторы представляют собой оптические

устройства, предназначенные для выделения из естественного неполяризованного или из частично поляризованного света одной компоненты колебаний электрического вектора, ориентированной в определенном направлении. Физический принцип действия линейных поляризаторов может различаться в зависимости

от их конструкции. Так, линейные поляризаторы можно разделить на два типа: "лучеразделяющие" и поглощающие (абсорбционные). К "лучеразделяющим" относятся устройства, работающие на основе явления Брюстера, двойного лучепреломления (призмы Николя, Глана–Томпсона и др.), интерференции (тонкопленочные поляризационные покрытия) и дифракции (поляризационные решетки). Физический принцип работы поглощающих поляризаторов основан на явлении дихроизма, которое связано с анизотропией оптических свойств определенных материалов. Природный дихроизм наблюдается в кристаллах, например в турмалине. Индуцированный дихроизм характерен для синтезированных материалов, в матрицу которых вводятся молекулы дихроичных агентов. Они выстраиваются в определенном направлении, формируя анизотропное поглощение. Такие линейные поглощающие поляризаторы широко используются в качестве антибликовых покрытий в микроскопах, телескопах, фото- и видеотехнике, на автомобильных стеклах. Для задач фотоники важна возможность применения поглощающих поляризаторов в жидкокристаллических структурах, являющихся неотъемлемой частью дисплейной техники, голографических технологий, адаптивной оптики и устройств оптической связи [7, 8].

Наиболее распространенный материал для синтеза поглощающих поляризаторов – поливиниловый спирт (ПВС). Он отличается высокой пленкообразующей способностью, гибкостью, прозрачностью и механической прочностью, что делает его удобной основой для получения оптически активных и функциональных материалов [9]. Важное преимущество ПВС – его растворимость в воде, что обеспечивает экологичность технологического процесса, а также биоразлагаемость и биосовместимость, позволяющие применять материалы на его основе в биомедицине и смежных областях [10].

С химической точки зрения ПВС представляет собой линейный полимер с повторяющимся звеном $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-$, содержащий большое количество гидроксильных групп, благодаря которым формируются многочисленные межмолекулярные водородные связи. Эти связи обеспечивают высокую когезионную

энергию, устойчивость к деформации и способность образовывать упорядоченные структуры при ориентации или сшивке. Кроме того, наличие активных гидроксильных групп обуславливает высокую химическую реакционную способность, что позволяет эффективно модифицировать ПВС различными добавками, в том числе красителями, наночастицами углеродных материалов, оксидов металлов и слоистых минералов. Именно возможность управления молекулами матрицы ПВС позволяет получать анизотропию полимерной структуры.

Благодаря этим свойствам ПВС широко используется не только как оптический и поляризационный материал, но и в качестве матрицы для создания нанокompозитов, мембран, биосовместимых покрытий, гидрогелей, а также гибких электрооптических элементов. Его совместимость с наночастицами, в том числе шунгитом, графеном и углеродными нанотрубками, открывает возможность целенаправленного регулирования оптических, механических и электрических свойств получаемых композитов [11–13].

Несмотря на широкий спектр применений и благоприятное сочетание физико-химических свойств, чистый поливиниловый спирт обладает рядом ограничений, которые сдерживают его использование в высоконагруженных и функционально сложных материалах и оптико-электронных схемах. Основные проблемы связаны с низкой механической прочностью, чувствительностью к влаге и ограниченной термической стабильностью. Избыточная гидрофильность ПВС приводит к снижению стабильности его структуры при контакте с водой и изменению оптических характеристик во влажной среде. Кроме того, при длительной эксплуатации материал склонен к деформации и частичной релаксации ориентации макромолекул, что негативно влияет на сохранение анизотропных свойств, необходимых для работы поляризаторов и других оптических элементов.

Один из традиционных и наиболее широко применяемых способов повышения прочностных характеристик пленок из ПВС – ламинирование [14]. Данный метод основан на соединении нескольких слоев ПВС-пленок в единый композитный материал. Процесс ламинирования может осуществляться тепловым прессо-

ванием, химическим сшиванием на межфазной границе и нанесением промежуточного клеевого слоя. С физико-химической точки зрения данный метод направлен на перераспределение механических нагрузок между слоями и повышение сопротивления разрыву и проколу за счет формирования многослойной структуры.

Многослойная структура позволяет значительно увеличить предел прочности при растяжении и модуль упругости за счет взаимного армирования слоев, а при использовании прозрачных клеевых промежуточных слоев композит сохраняет высокую светопропускную способность. Несмотря на увеличение общей прочности ламинированного элемента, различия в толщине или плотности слоев могут приводить к интерференционным эффектам, снижая однородность светопропускания, что является крайне деструктивным воздействием для оптических систем. Кроме того, при значительном различии в механических характеристиках отдельных слоев возможна потеря гибкости и появление микротрещин. В связи с этим в последние годы растет интерес к наномодифицированным композитам [15, 16], где упрочнение достигается на молекулярном уровне, за счет межфазных взаимодействий полимерных матриц с наночастицами и формирования ориентированных структур.

Шунгит – это углеродсодержащая порода органического происхождения, представляющая собой композитный графитоподобный материал, обладающий комплексом уникальных физико-химических свойств. Он характеризуется содержанием углерода от 20 до 98 %, в зависимости от месторождения и степени метаморфизма. Основные месторождения шунгита сосредоточены в Карелии (Россия), в частности в районе Шуньгского месторождения, откуда и происходит название породы [17, 18]. Согласно простейшей минералогической классификации [19] различают 5 типов шунгитной породы по содержанию углерода: шунгит I (с содержанием углерода в породе более 98 %), шунгит II (35...75 %), шунгит III (20...35 %), шунгит IV (10...20 %), шунгит V (менее 10 %). Аморфный углерод шунгита имеет слоисто-гетерогенную структуру, в которой наблюдаются наноразмерные графеноподобные фрагменты типа фуллерено-

подобных кластеров размером 1...10 нм. Они распределены в силикатной матрице, представленной в основном в виде кварца (SiO_2) [20]. Кроме аморфного углерода в шунгитных породах содержатся TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O , S, а также и другие компоненты в малом количестве.

Благодаря высокой дисперсности и наличию свободных связей в углеродной решетке шунгит проявляет способность к функционализации поверхности – введению кислородсодержащих групп ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{C}=\text{O}$). Эти группы способны обеспечить химическую совместимость шунгита с такими полимерными матрицами, как ПВС. Для увеличения сорбционной активности и улучшения межфазного взаимодействия шунгит подвергается механическому измельчению до размера частиц 20...100 нм.

Наночастицы шунгита находят применение в нанотехнологиях как источник углеродных нанокластеров и фуллереноподобных структур [21–23], в медицине и биотехнологии как сорбент и антибактериальный агент [24], в оптике и электронике как электропроводящий и поглощающий компонент [25]. Шунгит также широко известен как эффективный природный упрочнитель строительных и композиционных материалов [26]. Благодаря своему минеральному составу и наличию углеродной фазы он повышает прочность, износостойкость и долговечность различных строительных смесей, бетонов и покрытий. Однако применение наночастиц шунгита в качестве упрочняющего компонента в полимерных системах оптики и электроники, в том числе в поляризационной технике, ранее не было подробно описано в научной литературе.

Методы (материалы и методы). Логика работы основывается на поэтапном изучении связи между составом, структурой и свойствами полученных поляризационных материалов. Сначала проводится синтез пленок ПВС с различной массовой долей наночастиц шунгита (от 0.05 до 0.15 %), затем проводится их борирование, йодирование и одноосное растяжение, после чего исследуются их спектральные и механические характеристики. Технологический процесс схематично проиллюстрирован на рис. 1.

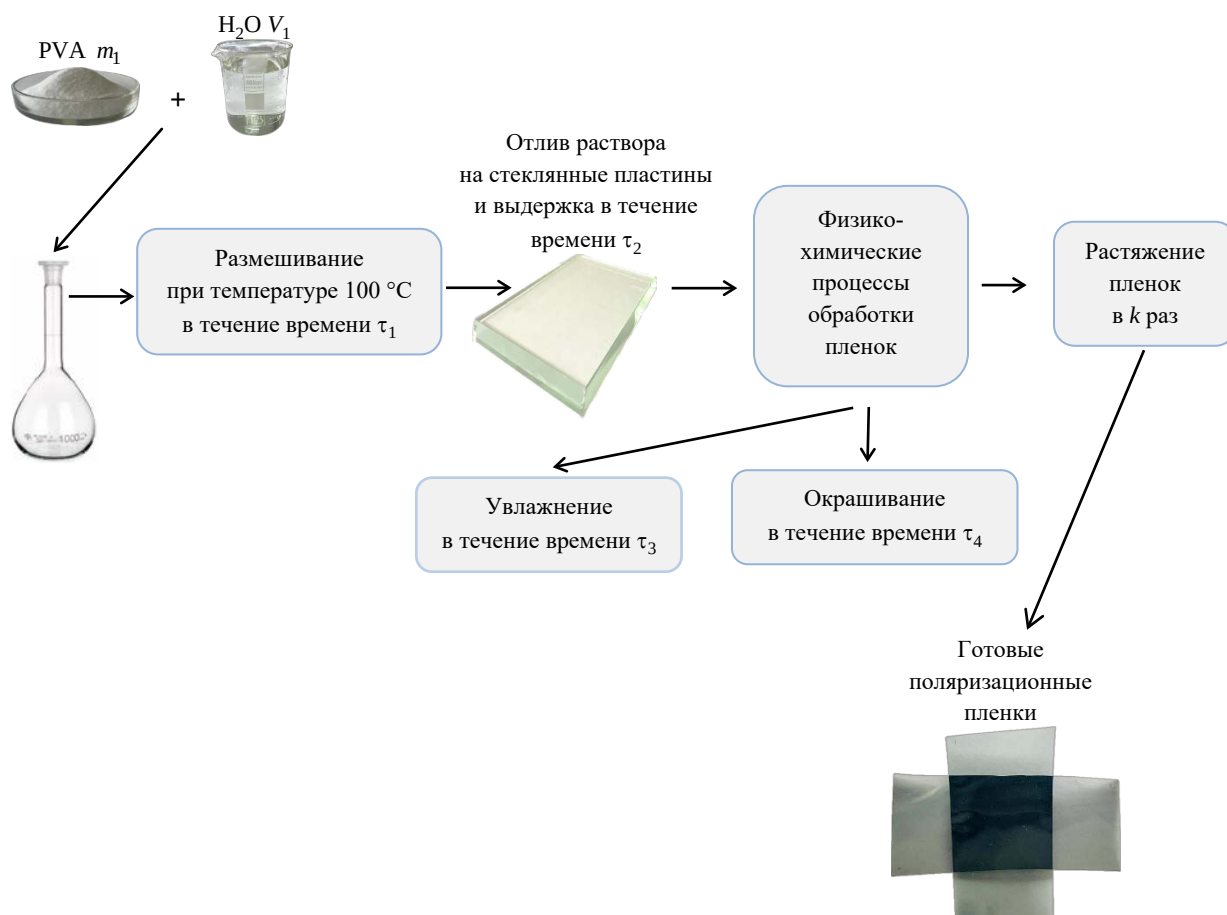


Рис. 1. Схема технологического цикла синтеза поляризационных пленок

Fig. 1. Process flow diagram for the synthesis of polarizing films

Синтез поляризационных композитов "ПВС + шунгит" осуществляется по технологии, разработанной в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург, Россия) [27]. В качестве полимерной матрицы используется поливиниловый спирт марки 40/2 отечественного производства, отличающийся высокой степенью полимеризации за счет высокой относительной молекулярной массы (более 300 000 а. е. м.) и хорошей пленкообразующей способностью. Для приготовления 8 %-го водного раствора ПВС порошок растворяется в дистиллированной воде при постоянном перемешивании с частотой до 12 мин^{-1} и при температуре 100°C . Данный процесс продолжается до получения прозрачного однородного раствора, после чего он охлаждается до комнатной температуры. На этом этапе в раствор вводится сенситизатор, полученный из Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Россия), – наночастицы шунгита диаметром $20\text{--}100 \text{ нм}$ с 30 %-м содержанием углерода. Полученный

раствор отливается на стеклянные подложки, на которых происходит естественное высыхание пленок в течение недели. Затем пленки подвергаются увлажнению в парах воды, что способствует их пластичности перед последующей обработкой.

Далее образцы активируются в растворе борной кислоты (время экспозиции $\sim 7\text{--}8 \text{ мин}$), что приводит к частичной сшивке макромолекул ПВС и формированию устойчивой матричной структуры. После этого проводится окрашивание пленок в водном растворе йода (время экспозиции $\sim 30 \text{ с}$), йод внедряется в полимерную матрицу, образуя дихроичные комплексы, ответственные за первичные, базовые поляризационные свойства материала.

Заключительный этап – одноосное растяжение пленок от 1.8 до 3.3 раз. При меньших степенях растяжения материал сохраняет изотропность, а при растяжении свыше 3.3 пленка может лопнуть. После этого образцы фиксируются в натянутом состоянии и выдерживаются при

комнатной температуре в течение одной недели для стабилизации химических и физических связей. Общий цикл синтеза одной партии пленок занимает около двух недель. Для сравнения оптических характеристик один из образцов был подвержен горячему ламинированию в полиэтилентерефталат при температуре 100 °С.

Оптические свойства композитных пленок исследуются в диапазоне длин волн 400...1200 нм с использованием спектрофотометра УФ-3200. Измеряются спектры пропускания параллельной $T_{||}$ и перпендикулярной $T_{\perp}$ компонент света. Для обеспечения точности используются калиброванные фильтры; погрешность измерений составляет не более 0.2 %. На основании измеренных данных рассчитывается степень поляризации P [28], что позволяет оценить работоспособность поляризаторов и влияние ориентации макромолекул и концентрации наночастиц шунгита на оптическую анизотропию материала:

$$P = \frac{T_{||} - T_{\perp}}{T_{||} + T_{\perp}}.$$

Твердость – это физико-механическое свойство материала, характеризующее его сопротивление пластической деформации или разрушению при локальном механическом воздействии. Значение твердости отражает способность материала сохранять форму под нагрузкой и напрямую связано с износостойкостью и устойчивостью к механическим повреждениям. Как правило, твердость материала характеризуют по способу определения: склерометрическая (твердость при царапании), абразивная (твердость при шлифовании), микротвердость (твердость при вдавливании). Таким образом, микротвердость – это частный случай параметра твердости, определяемый при малых нагрузках, когда глубина проникновения индентора не превышает нескольких микрометров. Понятие микротвердости особенно актуально для тонких пленок, покрытий и нанокompозитов, если необходимо исследовать механические свойства на поверхностном уровне без значительного повреждения образца.

Микротвердость материала зависит от совокупности факторов. Во-первых, высокое сопротивление деформации определяется наличием

прочных ковалентных и водородных связей, высоким уровнем кристалличности и плотностью структуры. Во-вторых, введение в полимерную матрицу нанонаполнителей, а также ее молекулярная ориентация могут способствовать увеличению микротвердости. Стоит отметить, что температура и влажность среды также могут влиять на механические параметры полимеров за счет пластифицирующего эффекта. Пленки обрабатываются, исследуются и хранятся в помещении при постоянных значениях температуры и влажности – 20 °С и 30 % соответственно.

Для оценки твердости материалов в макромасштабе применяются классические методы, основанные на вдавливании индентора в поверхность под заданной нагрузкой. Наиболее распространены методы Бринелля (ГОСТ 9012–59) и Роквелла (ГОСТ 9013–59), которые более применимы для металлов и жестких материалов. Для тонких пленок и нанокompозитов используются методы микроиндентирования, среди которых наиболее распространены способы Виккерса, Кнуппа и Оливера–Фарра. Метод Кнуппа (ГОСТ Р ИСО 4545-4-2015) использует алмазную пирамиду с вытянутым основанием, что позволяет исследовать анизотропные материалы и тонкие покрытия, не повреждая подложку. Микротвердость в данном случае определяется по длине большой диагонали отпечатка. Метод Оливера–Фарра основан на непрерывном измерении зависимости "нагрузка–глубина вдавливания" с помощью наноиндентора, он позволяет определить модуль упругости, твердость и параметры пластической деформации в рамках одной процедуры.

Используемый для измерения прибор АО "ЛОМО" ПМТ-3М позволяет применять метод Виккерса (метод восстановленного отпечатка от призмы Виккерса), который основан на вдавливании алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине 136° (ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007). Геометрическое представление метода измерения представлено на рис. 2.

Измерение микротвердости осуществляется в несколько этапов. Сначала пленки закрепляются на твердой ровной подложке измерительного прибора. Нагрузка подбирается так, чтобы отпечатки на испытываемых образцах имели четкие границы и не вызывали разрушения плен-

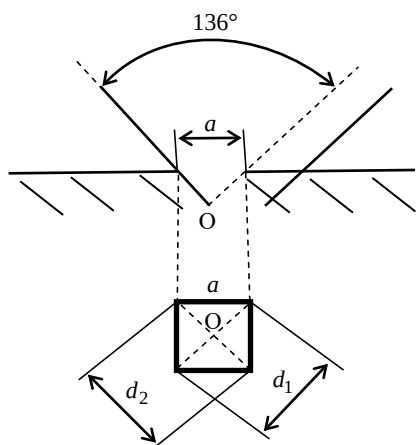


Рис. 2. Геометрическое представление измерения микротвердости поверхности

Fig. 2. Geometric representation of surface microhardness measurement

ки, значения нагрузки M изменяются от 1 до 5 г для каждого образца. Стоит отметить, что при меньших значениях нагрузки зона пластической деформации очень мала, существенная часть нагрузки уходит на преодоление поверхностного натяжения, а не на саму деформацию. Затем алмазный индентор плавно вводится на поверхность пленок в течение ~15 с, удерживается в течение 10 с и медленно отводится. Важно то, что все отпечатки наносятся в фиксированном направлении, так как в анизотропных материалах микротвердость может различаться в разных направлениях. После снятия нагрузки под микроскопом измеряются обе диагонали отпечатков d_1 и d_2 (в микрометрах) и рассчитываются средние значения $d = (d_1 + d_2)/2$.

Для каждого значения нагрузки на каждом образце проводится по 5 измерений. Микротвердость H вычисляется по формуле Виккерса:

$$H = 1.854 \frac{M}{d^2}.$$

Недостаток данного метода – высокая погрешность геометрических измерений, потому далее обязательно рассчитывается среднее значение $H_{\text{ср}}$ и среднеквадратичное отклонение (СКО) для всех пяти измерений при каждой нагрузке. На рис. 3, а–в представлены примеры изображений поверхностей образцов, для которых измерить микротвердость было невозможно. На рис. 3, а представлен пример изображения поверхности образца, рельеф которой был сильно изменен в результате йодирования и сенсibilизации наночастицами, из-за чего индентор соскальзывал с поверхности, оставляя смазанные отпечатки. На рис. 3, б изображен пример снимка поверхности образца, отпечатки на котором не видны из-за сильного растяжения и, как следствие, высокой степени шероховатости поверхности. На рис. 3, в представлено изображение поверхности с нормальными отпечатками, подлежащими измерениям.

Поскольку микротвердость отражает локальное сопротивление материала пластической деформации, она тесно связана с его упругими модулями. Расчет модуля Юнга позволяет оценить жесткость материала, т. е. способность сопротив-

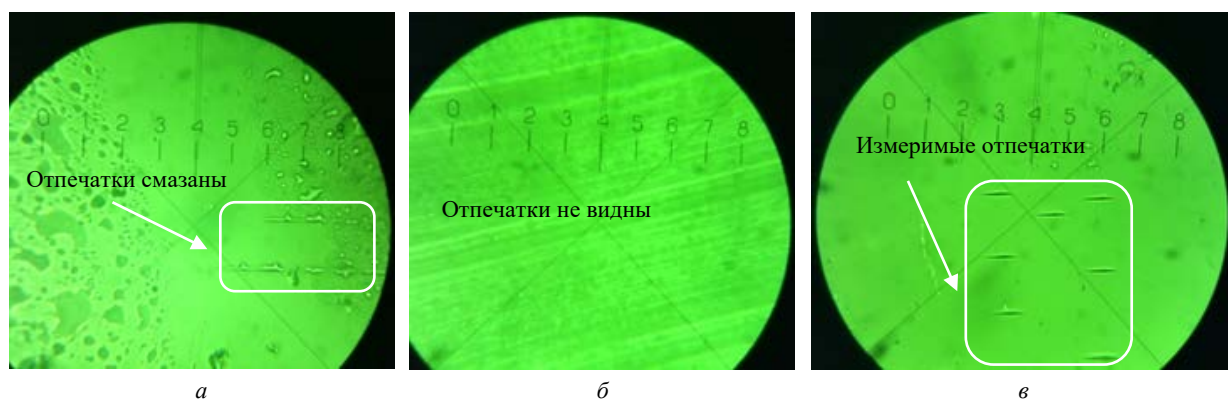


Рис. 3. Примеры изображений поверхностей при измерении микротвердости: а – отпечатки на поверхности смазаны – образец не подлежит измерениям; б – отпечатки не видны – образец не подлежит измерениям; в – контуры отпечатков четкие – образец подлежит измерениям

Fig. 3. Examples of surface images obtained during microhardness testing:

а – indents are smeared; the sample is unsuitable for measurement; б – indents are not visible; the sample is unsuitable for measurement; в – indent contours are well defined; the sample is suitable for measurement

ляться упругим деформациям при растяжении или сжатии, а коэффициент Пуассона характеризует поперечную деформацию при осевом нагружении, тем самым описывая анизотропию и внутренние связи в структуре композита.

Для статистического расчета модуля Юнга шунгитной породы $E_{ш}$ можно использовать принцип аддитивности, взяв известные объемные доли и значения модуля Юнга компонентов шунгита как системы:

$$E_{ш} = \sum E_i v_i, \quad (1)$$

где E_i – модуль Юнга i -го компонента; v_i – объемная доля i -го компонента. Так как из литературы известны только массовые доли m_i , значения объемных долей можно найти, используя значения плотности компонентов:

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i}, \quad (2)$$

где V_i – относительный объем компонента. Нормируя значения V_i , можно получить необходимые значения объемных долей системы:

$$v_i = \frac{V_i}{\sum V_i}. \quad (3)$$

Правило смесей [29] позволяет построить теоретическую модель зависимости модуля Юнга

композитной системы на основе полимерной матрицы ПВС от объемной доли шунгита в ней:

$$E_k = E_{ПВС}(1 - \varphi) + E_{ш}\varphi, \quad (4)$$

где E_k – модуль Юнга композита; $E_{ПВС}$ – модуль Юнга ПВС (~ 2 ГПа); $E_{ш}$ – модуль Юнга шунгита; φ – объемная доля шунгита в композите.

Расчет коэффициентов Пуассона γ производится по принципу аддитивности аналогично расчету модулей Юнга с учетом табличных значений для каждого компонента шунгита. Значения коэффициента, как правило, должны находиться в диапазоне от 0 до 0.5, при этом при $\gamma = 0$ поперечной деформации материала не происходит, при γ близким к 0.5 материал обладает наиболее эластичными свойствами. Табличные значения для компонентов шунгита были получены из базы данных [30].

Результаты. Для всех изготовленных поляризационных образцов получены графики зависимостей их степени поляризации от длины волны в видимом диапазоне спектра. На рис. 4 представлены графики для тех образцов, для которых удалось далее измерить микротвердость их поверхности, а также график для ламинированного образца. Из представленных данных видно, что все образцы, кроме ламинированного, демонстрируют степень поляризации не ниже 95 % в диапазоне

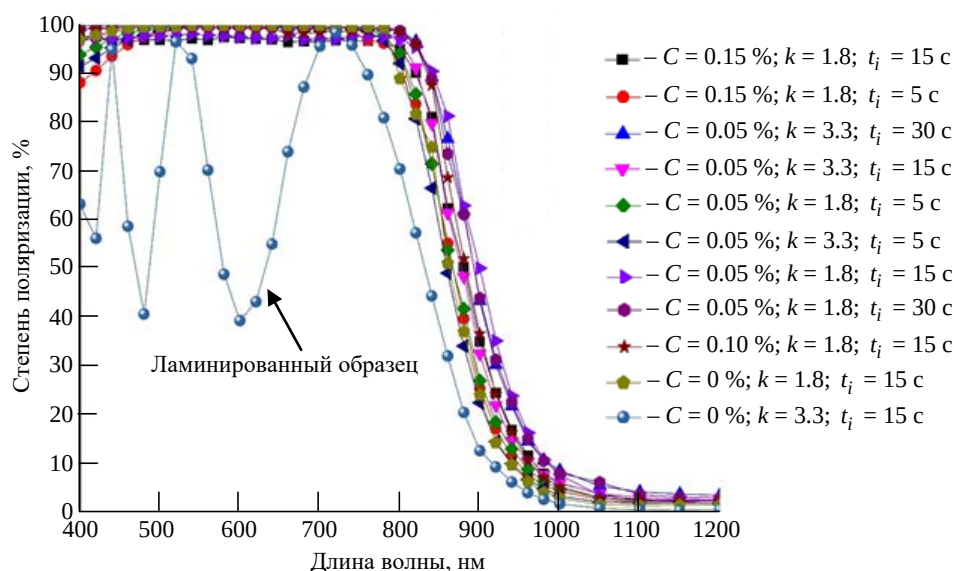


Рис. 4. Графики зависимости степени поляризации образцов от длины волны при различных значениях технологических параметров

Fig. 4. Polarization degree of the samples as a function of wavelength under different processing conditions

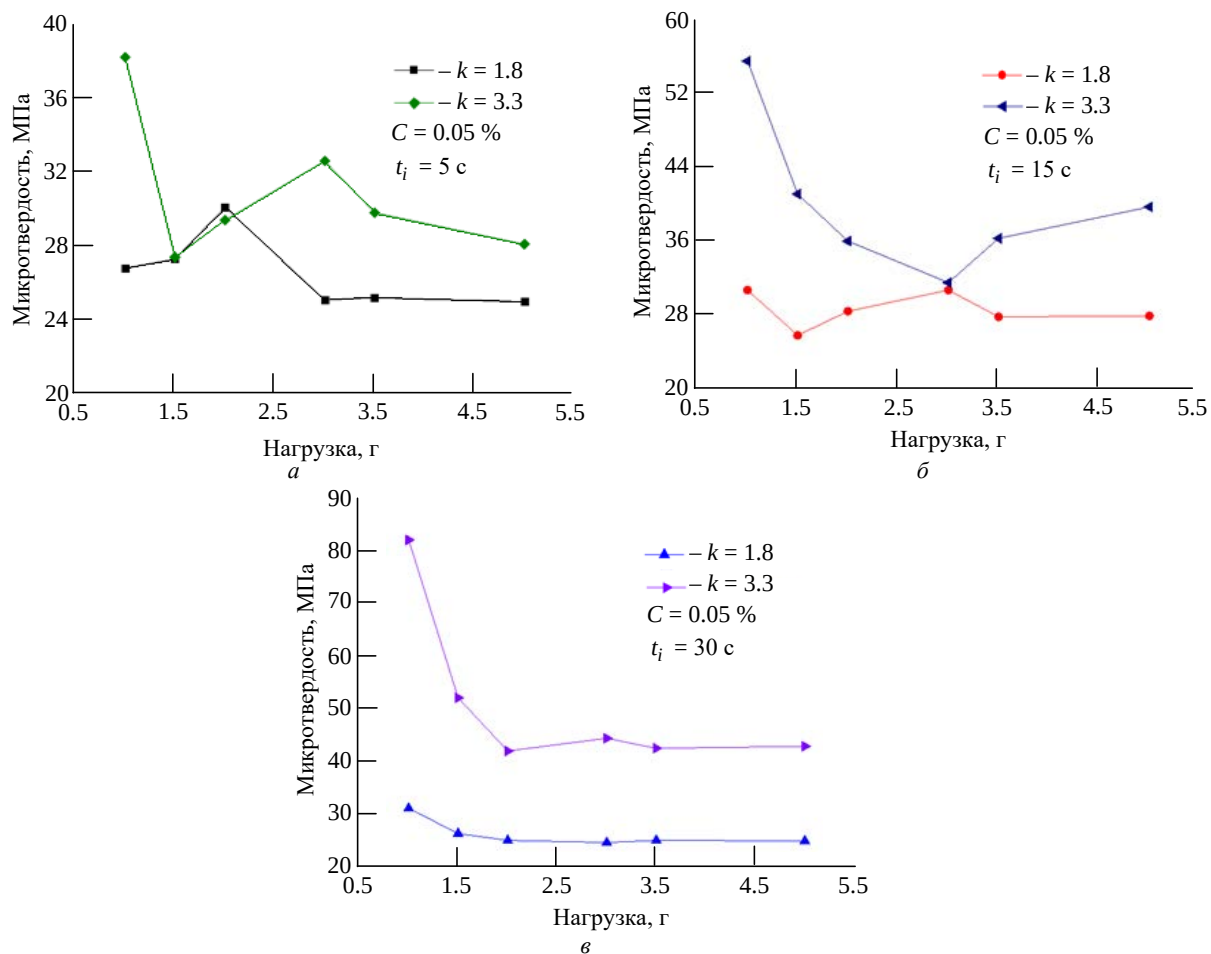


Рис. 5. Графики зависимости микротвердости поверхности пленок от прикладываемой к ним нагрузки и степени их растяжения при времени йодирования: *a* – 5 с; *b* – 15 с; *v* – 30 с

Fig. 5. Surface microhardness of the films as a function of applied load and film elongation at iodination times of: *a* – 5 s; *b* – 15 s; *v* – 30 s

450...800 нм. В то же время для ламинированного образца наблюдается выраженная интерференционная картина, которая существенно ограничивает возможность его использования в качестве поляризатора.

На рис. 5 представлены зависимости микротвердости поверхности от степени растяжения образца: *a* – при массовой доле шунгита в матрице ПВС 0.05 % и времени йодирования 5 с; *b* – при массовой доле шунгита в матрице ПВС 0.05 % и времени йодирования 15 с; *v* – при массовой доле шунгита в матрице ПВС 0.05 % и времени йодирования 30 с. С одной стороны, растяжение пленок приводит к уменьшению их толщины, что, на первый взгляд, должно способствовать уменьшению их прочностных характеристик. Однако для всех типов исследуемых образцов увеличение степени растяжения пленок приводит к более вы-

соким значениям микротвердости поверхности. Следует отметить, что значения микротвердости при малых нагрузках (1 и 1.5 г) существенно выбиваются из общей зависимости и являются нерепрезентативными для анализа влияния технологических параметров. Это связано со специфическими особенностями метода измерения, описанными ранее. Указанный эффект наблюдается для всех графиков, представленных на рис. 5–7. Для каждого образца при фиксированном значении нагрузки среднеквадратичное отклонение не превышало 2 МПа.

На рис. 6 представлены графики зависимости значений микротвердости от времени йодирования пленок: *a* – при массовой доле шунгита в матрице ПВС 0.05 % и растяжении в 3.3 раза; *b* – при массовой доле шунгита в матрице ПВС 0.15 % и растяжении в 1.8 раз. Из графиков видно, что при малых значениях растяжения микро-

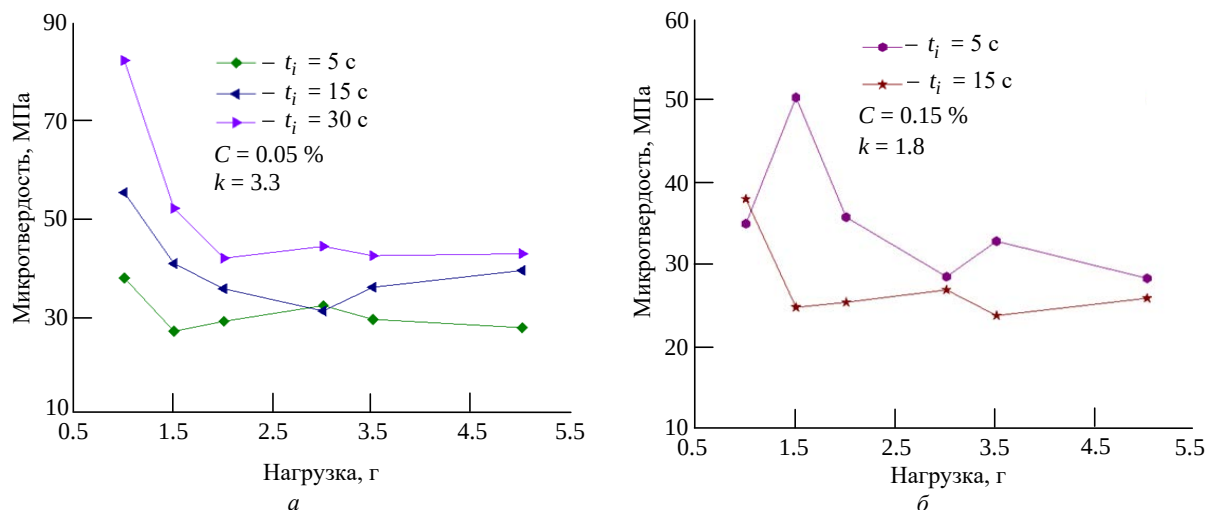


Рис. 6. Графики зависимости микротвердости поверхности пленок от прикладываемой к ним нагрузки и времени их йодирования: а – при массовой доле шунгита 0.05 % и растяжении пленок в 3.3 раза; б – при массовой доле шунгита 0.15 % и растяжении пленок в 1.8 раз

Fig. 6. Surface microhardness of the films as a function of applied load and iodination time: а – shungite mass fraction 0.05 % and film elongation by a factor of 3.3; б – shungite mass fraction 0.15 % and film elongation by a factor of 1.8

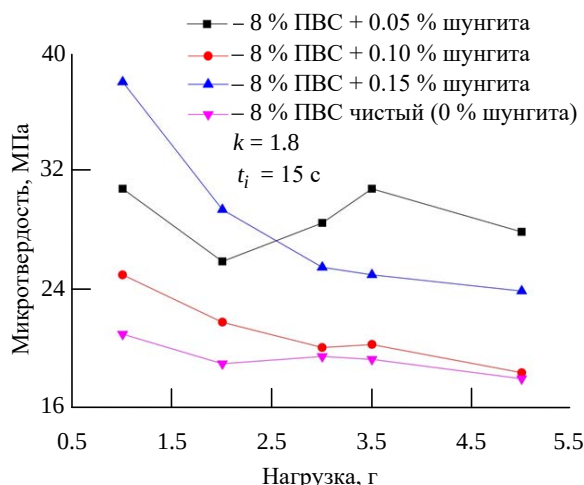


Рис. 7. Графики зависимости микротвердости поверхности пленок от прикладываемой к ним нагрузки и массовой доли шунгита, введенного в матрицу ПВС

Fig. 7. Surface microhardness of the films as a function of applied load and shungite concentration introduced into the PVA matrix

твердость поверхности уменьшается с увеличением времени йодирования. Однако при больших значениях растяжения увеличение времени йодирования влияет на микротвердость поверхности обратным образом – микротвердость возрастает.

На рис. 7 представлены графики зависимости микротвердости поверхности от массовой доли шунгита в матрице ПВС при фиксированных значениях степени растяжения и времени йодирования ($k = 1.8$; $t_i = 15$ с). Добавление шунгита во всех случаях приводит к упрочне-

нию поверхности. Наибольшими значениями микротвердости при нагрузке от 3 г обладает образец с массовой долей шунгита 0.05 %.

По (1)–(3) были вычислены значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для шунгита с учетом массовых долей всех его компонентов. Получено, что модуль Юнга шунгита составляет 53.8 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0.18. Дополнительно был оценен вклад каждого компонента в формирование этих характеристик. Модуль Юнга шунгита определяется вкладом кварца на 66.8 %; оксида алюминия – на 16.2 %; углерода – на 7.2 %. Коэффициент Пуассона формируется за счет вклада кварца на 46.4 %; углерода – на 36 %; кристаллической воды – на 7 %.

С использованием (4) были получены значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для композита "ПВС + 0.1 % шунгита": модуль Юнга равен 2.030 ГПа; коэффициент Пуассона – 0.442. Добавление шунгита в матрицу ПВС приводит к увеличению модуля Юнга поляризационного образца на 1.548 %, а коэффициента Пуассона – на 0.035 %. Подробные данные и результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Обсуждение. Заключение. Выводы. В ходе описываемой работы установлено, что технологические параметры синтеза поляризационных ПВС-пленок влияют на их оптические и прочностные характеристики. Дальнейшее рас-

Табл. 1. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона шунгита

Tab. 1. Young's modulus and Poisson's ratio of shungite

Компоненты шунгита	Массовая доля, %	ρ , г/см ³	E_i , ГПа	Вклад в $E_{ш}$, %	$E_{ш}$, ГПа	γ_i	Вклад в $\gamma_{ш}$, %	$\gamma_{ш}$
SiO ₂	57.00	2.65	72.00	66.80	53.80	0.17	46.39	0.18
C	30.00	1.80	10.00	7.19		0.17	35.94	
Al ₂ O ₃	4.00	3.95	370.00	16.16		0.22	2.83	
H ₂ O	1.70	1.00	0.0001	0.00		0.33	7.12	
Fe ₂ O ₃	1.49	5.34	200.00	2.41		0.30	1.06	
K ₂ O	1.50	2.32	40.00	1.12		0.29	2.38	
S	1.20	2.07	2.00	0.05		0.30	2.21	
MgO	1.20	3.58	300.00	4.34		0.18	0.77	
FeO	0.60	5.70	140.00	0.64		0.29	0.39	
CaO	0.30	3.34	110.00	0.43		0.31	0.35	
TiO ₂	0.20	4.23	230.00	0.47		0.27	0.16	
Na ₂ O	0.20	2.27	50.00	0.19		0.28	0.31	
MnO	0.15	5.43	180.00	0.21		0.29	0.10	

Табл. 2. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для композитной системы "ПВС + шунгит"

Tab. 2. Young's modulus and Poisson's ratio of the composite system "PVA + shungite"

Общие характеристики для расчетов	Массовая доля шунгита	0.001
	Массовая доля ПВС	0.999
	Плотность шунгита, г/см ³	2.000
	Плотность ПВС, г/см ³	1.190
	Объемная доля шунгита, %	0.060
Модуль Юнга, ГПа	ПВС	2.000
	Шунгит	53.800
	ПВС + шунгит	2.030
Изменение модуля Юнга при добавлении шунгита, %		1.548
Коэффициент Пуассона	ПВС	0.440
	Шунгит	0.180
	ПВС + шунгит	0.442
Изменение коэффициента Пуассона при добавлении шунгита, %		0.035

но-следственных связей между технологическими параметрами, структурными изменениями и итоговыми свойствами поляризационных

пленок. Это позволит не только объяснить наблюдаемые экспериментальные эффекты, но и определить оптимальные условия изготовления материалов с заданным набором функциональных характеристик.

1. Результаты исследования оптической поляризации (см. рис. 4) показали, что ламинированный образец демонстрирует выраженную интерференционную картину в спектральной зависимости степени поляризации. Появление интерференционных осцилляций объясняется формированием в ламинированной структуре тонкопленочного слоя с высокой оптической неоднородностью. Во время горячего ламинирования ПВС-пленка частично теряет влагу, локально изменяет толщину и может дополнительно ориентироваться или деформироваться под действием температуры и давления. В результате возникает система слоев с различающимися показателями преломления для составных частей системы – ПВС, клеевой прослойки и ламинирующей основы из полиэтилентерефталата. Такая многослойная структура ведет себя как интерфе-

ренционный фильтр, что проявляется в виде интенсивных спектральных колебаний степени поляризации. Неламинарованные образцы лишены этих дополнительных оптических границ и сохраняют равномерные значения степени поляризации по всей видимой области спектра. Это подтверждает, что собственно поляризационный слой ПВС обладает высокой однородностью и не создает условий для интерференции. Другими словами, неламинарованный образец ПВС с шунгитом можно рассматривать как самостоятельный оптический элемент.

Добавление наночастиц шунгита не сказывается отрицательно на оптических свойствах за счет малой концентрации и размера частиц, равномерного распределения по объему и химической совместимости с ПВС. Поэтому используя наноструктурирование ПВС шунгитом можно решать задачу упрочнения структуры не жертвуя ее оптическими свойствами.

2. С одной стороны, растягивание полимерных пленок приводит к уменьшению их толщины. Интуитивно это может ассоциироваться с ослаблением механических характеристик и снижением устойчивости материала к локальным деформациям. Однако результаты эксперимента показывают противоположную тенденцию (см. рис. 5): для всех исследованных типов образцов увеличение степени растяжения сопровождается ростом микротвердости поверхности.

Такое поведение связано с особенностями структурных преобразований, происходящих в ПВС-пленках при механическом ориентировании. В процессе растяжения макромолекулы поливинилового спирта, которые изначально находятся в более хаотично свернутом состоянии, начинают выстраиваться и вытягиваться вдоль направления деформации. Это приводит к формированию более упорядоченной структуры полимерной матрицы, где ПВС-спирали становятся вытянутыми и плотно упакованными. Упорядочение способствует увеличению плотности связей между цепями и, как следствие, повышению сопротивления материала локальному вдавливанию.

Кроме того, растяжение способствует более равномерному распределению наночастиц шунгита и цепочек йода по всему свободному объему пленки. В неориентированном состоя-

нии эти компоненты могут образовывать слабосвязанные скопления, локальные неоднородности или участки с повышенной концентрацией. При растяжении такие агрегаты разрушаются, и компоненты диспергируются более равномерно, что приводит к улучшению однородности микроstructures. Наночастицы, равномерно встроенные в ориентированную полимерную сеть, могут работать как дополнительные центры жесткости, а выровненные йодные цепочки усиливают поляризационные свойства структуры без ухудшения механики.

3. Известно, что в ориентированных пленках молекулы ПВС способны образовывать с йодом молекулярные соединения включения, клатраты [31]. При этом молекулы ПВС, закрученные в спирали, выступают в роли "хозяев", а молекулы йода, образующие цепочки, – в качестве "гостей".

Малое растяжение пленок способствует недостаточному ориентированию молекул ПВС, из-за чего, вероятно, клатраты с йодом формируются неэффективно, свободный объем полимерной матрицы не заполняется. При малом растяжении пленок и увеличении времени йодирования свободный объем все также остается незаполненным, между ПВС-молекулами и молекулами йода образуются непрочные приповерхностные связи, которые легко разорвать. Поэтому при малых значениях растяжения микротвердость поверхности уменьшается с увеличением времени йодирования (см. рис. 6, б). Эффективное формирование молекулярных соединений включения между ПВС и йодом достигается за счет ориентирования ПВС-цепей. С ростом времени йодирования происходит большее заполнение свободного объема полимерной матрицы с более прочными молекулярными соединениями, что приводит к увеличению микротвердости поверхности (см. рис. 6, а).

4. При исследовании зависимости микротвердости поверхности ПВС от массовой доли наночастиц шунгита в его объеме установлено, что максимальные значения микротвердости наблюдаются у пленок, содержащих 0.05 % наночастиц шунгита (см. рис. 7). Такой эффект связан с тем, что при низкой массовой доле наночастицы наиболее эффективно интегрируются в полимерную матрицу ПВС и выполняют роль структурных центров жесткости. При содержа-

нии около 0.05 % наночастицы хорошо диспергированы, но не склонны к агрегации и равномерно распределяются между цепями ПВС. В таком состоянии они усиливают межмолекулярные взаимодействия, ограничивают локальные подвижности полимерных сегментов и создают дополнительные связи на границах "полимер–наполнитель", что приводит к росту локальной сопротивляемости материала деформации, т. е. к увеличению микротвердости.

Предполагаем, что при более высоких значениях массовой доли шунгита (0.1 и 0.15 %) усиливается тенденция наночастиц к агломерации. Образующиеся агрегаты нарушают равномерность структуры, создают локальные дефекты и уменьшают эффективную поверхность взаимодействия наночастиц с полимером. Такие агломераты могут даже формировать зоны, более подверженные деформации, что, вероятно, и приводит к снижению микротвердости. Стоит отметить, что само по себе введение наночастиц шунгита, вне зависимости от их содержания, приводит к повышению микротвердости поверхности ПВС-пленок. Это связано с тем, что даже небольшое количество частиц работает как дополнительный армирующий компонент, они ограничивают подвижность полимерных сегментов, повышают жесткость локальных областей и усиливают межмолекулярные взаимодействия внутри матрицы. В результате пленка приобретает более устойчивую и механически прочную структуру по сравнению с исходным немодифицированным материалом.

5. Помимо исследования поверхностной механической характеристики пленок (микротвердости поверхности) были также рассчитаны и значения объемных характеристик структуры. Результаты (см. табл. 2) демонстрируют, что даже небольшие добавки шунгита в матрицу ПВС способны оказывать умеренное упрочняющее действие (увеличение модуля Юнга на 1.6 % и коэффициента Пуассона на 0.035 %), однако заметное изменение макроскопических механических характеристик может наблюдаться лишь при существенном увеличении наполнения.

С учетом того, что добавление даже 0.05 % наночастиц шунгита способно приводить к увеличению микротвердости в 1.6 раз, можно прийти к выводу о формировании межфазно-

го слоя "ПВС–шунгит" и увеличении локальной концентрации наночастиц в приповерхностной зоне, что проявляется в поверхностных тестах значительно сильнее, чем в расчетах объемных упругих параметров.

Также установлено, что механические параметры шунгита определяются сочетанием жестких минеральных фаз и эластичных углеродных структур, формируя комплексный упругий ответ материала. Среди всех компонентов шунгита основной вклад в значение модуля Юнга вносят кварц, оксид алюминия и углерод, что связано с их высокой жесткостью и значительными массовыми долями в составе. В значение коэффициента Пуассона основной вклад вносит кварц за счет высокой массовой доли, а также углерод и кристаллы воды вследствие высоких собственных значений коэффициента Пуассона.

6. Наиболее оптимальными параметрами получения поляризационных ПВС-пленок по представленной технологии являются следующие: степень одноосного растяжения, близкая к максимально допустимой (до 3.3-кратного удлинения, при превышении которого возрастает риск разрушения пленки); время йодирования около 30 с (более длительная обработка приводит к заметному снижению прозрачности); массовая доля наночастиц шунгита в матрице ПВС – 0.05 % как обеспечивающая баланс между механическими и оптическими характеристиками. Предложенный метод эффективен для создания легких, гибких, механически прочных и оптически стабильных материалов, что делает поляризационные пленки "ПВС + шунгит" перспективным композитом для применения в сенсорах, оптических модуляторах, гибких поляризаторах и прозрачных элементах электроники.

7. Для анализа поверхностной активности шунгита в дальнейшем планируется проведение эксперимента на приборе по тестированию смачиваемости поверхности ОСА 15ЕС. Также в качестве продолжения исследования поверхностных свойств ПВС, модифицированного шунгитом, планируется тестирование пленок с помощью атомно-силового микроскопа. Склонность частиц шунгита к агрегации при их массовой доле в матрице ПВС более 0.05 % может быть уменьшена с помощью предварительной ультразвуковой обработки порошка шунгита.

Список литературы

1. Shaw J. A., Vollmer M. Blue sun glints on water viewed through a polarizer // *Applied Optics*. 2017. Vol. 56, № 19. P. 36–41.
doi: 10.1364/AO.56.000G36
2. Lightweight Visible Light Positioning for Wearables / Z. Yang, Z. Wang, J. Zhang, Ch. Huang, Q. Zhang // *Mobile Computing and Communications*. 2015. Vol. 19, № 3. P. 18–21.
doi: 10.1145/2867070.2867077
3. Mercatelli L. Examining polarizing and non-polarizing filters for road sports // *Frontiers in Sports and Active Living*. 2023. Vol. 5. Art. № 1236473.
doi: 10.3389/fspor.2023.1236473
4. Zhang Y., Wu J. Advanced optical polarizers based on 2D materials // *Nanophotonics*. 2024. Vol. 1, № 28. P. 1–9.
doi: 10.1038/s44310-024-00028-3
5. Kakiuchida H., Ogiwara A. Stimuli-Responsive Light-Diffusing Polarizers Self-Assembled of Liquid Crystals and Polymers // *Advanced Optical Materials*. 2024. Vol. 13, № 8. Art. № 2402711.
doi: 10.1002/adom.202402711
6. Nahal A., Kiasatfar O. Self-organized nanograting: a plasmonic dichroic polarizer // *Applied Physics A*. 2025. Vol. 131. Art. № 346.
doi: 10.1007/s00339-025-08479-x
7. Composite film polarizer based on the oriented assembly of electrospun nanofibers / Z. Hu, Z. Ma, M. Peng, X. He, H. Zhang, Y. Li, J. Qiu // *Nanotechnology*. 2016. Vol. 27, № 13. Art. № 135301.
doi: 10.1088/0957-4484/27/13/135301
8. Yang Y., Forbes A., Cao L. A review of liquid crystal spatial light modulators: devices, technologies, and applications // *Opto-Electronic Science*. 2023. Vol. 2, № 3. Art. № 230026.
doi: 10.29026/oes.2023.230026
9. Recent advances and challenges in thermal stability of PVA-based film: A review / G. Suleiman, X. Zeng, R. Chakma, I. Y. Wakai, Y. Feng // *Polymers for Advanced Technologies*. 2024. Vol. 35, iss. 2. Art. № e6327.
doi: 10.1002/pat.6327
10. The synthesis, mechanisms, and additives for bio-compatible polyvinyl alcohol hydrogels: A review on current advances, trends, and future outlook / M. Yang, Z. Wang, M. Li, Zh. Yin, H. A. Butt // *J of Vynyl and additive technology*. 2022. Vol. 29, № 6. P. 939–959.
doi: 10.1002/vnl.21962
11. Лихоманова С. В., Зверева Г. Н., Каманина Н. В. Влияние УФ-обработки на оптические и поверхностные характеристики пленок из поливинилового спирта, сенсibilизированного шунгитом // *Письма в ЖТФ*. 2023. Т. 49, вып. 21. С. 12–14.
doi: 10.21883/PJTf.2023.21.56456.19664
12. Эффект просветления и рельеф поверхности тонких пленок поливинилового спирта при варьировании концентрации оксида графена: Возможные области применения / Н. В. Каманина, А. С. Тойкка, Я. В. Барнаш, Л. О. Федорова, Р. М. Таркан, М. А. Ошколов, Ю. А. Зубцова, С. В. Лихоманова, П. В. Кужаков // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2023. № 3. С. 87–97.
doi: 10.18083/LCAppl.2023.3.87
13. Лихоманова С. В., Каманина Н. В. Влияние времени иодирования на спектральные и поляризационные характеристики поливинилспиртовых поляризаторов // *Письма в ЖТФ*. 2024. Т. 50, вып. 14. С. 40–43.
doi: 10.61011/PJTf.2024.14.58309.19891
14. Polyvinyl alcohol-based polarizers for new displays: molecules, processing and properties / Y. Li, J. Xie, H. Cheng, X. Wei, J. Chen, L. You, W. Chen // *Soft Matter*. 2025. Vol. 21, iss. 17. P. 3148–3167.
doi: 10.1039/d4sm01530d
15. Microhardness and wear behavior of nanodiamond-reinforced nanocomposites for dental applications / R. Moriche, J. Artigas-Arnaldas, B. Chetwani, M. Sánchez, M. Campo, M. G. Prolongo, J. Rams, S. G. Prolongo, A. Ureña // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 46, № 3. P. 2292–2303.
doi: 10.1002/pc.29104
16. Sharafeddin F., Shirani M., Jowkar Z. Assessing the Impact of Nano-Graphene Oxide Addition on Surface Microhardness and Roughness of Glass Ionomer Cements: A Laboratory Study // *Intern. J. of Dentistry*. 2024. Vol. 2024, № 1. Art. № 5597367.
doi: 10.1155/2024/5597367
17. Соколов В. А. Геология и литология карбонатных пород среднего протерозоя Карелии. Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 183 с.
18. Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1956. 92 с.
19. Шлянин А. Н., Кайряк А. И., Калиник Ю. К. Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования. Петрозаводск: Карелия, 1975. 240 с.
20. Шека Е. Ф., Рожкова Н. Н. Шунгит – природная кладовая наноразмерного восстановленного оксида графена // *Наносистемы*. 2014. Т. 6, № 1. С. 3–17.
21. Dimensionality, Function and Performance of Carbon Materials in Energy Storage Devices / J. Xiao, J. Han, Ch. Zhang, G. Ling, F. Kang, Q.-H. Yang // *Advanced Energy Materials*. 2021. Vol. 12, iss. 4. Art. № 2100775.
doi: 10.1002/aenm.202100775
22. Carbon-rich shungite as a natural resource for efficient Li-ion battery electrodes / N. Chou, N. Pierce, Y. Lei, N. Perea-López, K. Fujisawa, Sh. Subramanian, J. A. Robinson, G. Chen, K. Omichi, S. S. Rozhkov, N. N. Rozhkova, M. Terrones, A. R. Harutyunyan // *Carbon*. 2018. Vol. 130. P. 105–111.
doi: 10.1016/j.carbon.2017.12.109
23. Графеноподобный углерод шунгитовых пород карелии как основа для получения наноструктурированных пленок / А. А. Ковальчук, А. В. Приходько, О. И. Коньков, Н. Н. Рожкова // *Тр. Карельского научного центра РАН*. 2018. № 11. С. 121–127.
doi: 10.17076/geo858
24. Шевченко Т. В., Устинова Ю. В. Определение биологической активности шунгита // *Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения*.

нения и здоровьесберегающих технологий: сб. материалов I Междунар. конгресса. 2022. С. 504–506.
doi: 10.21603/I-IC-153

25. Тарасевич И. Ю., Бондаренко С. В. Исследование структурно-сорбционных и электрохимических свойств природного композитного материала шунгита // Коллоидный журн. 2008. № 3. С. 384–391.

26. Пыркин А. А., Лукутцова Н. П., Костюченко Г. В. К вопросу о повышении свойств мелкозернистого бетона микро- и нанодисперсными добавками на основе шунгита // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 2. С. 16–20.

27. Пат. RU 2 498 373 С2. Поляризационные пленки для видимого диапазона света с наноструктурированной поверхностью на основе углеродных нанотрубок и нановолокон / Н. В. Каманина, П. Я. Васильев, В. И. Студенов. Оpubл. 10.11.2013. Бюл. № 31.

28. Huard S. Polarization of light. New York: Wiley, 1997. 352 p.

29. Composite Materials Property Determination by Rule of Mixture and Monte Carlo Simulation / G. Yerbolat, Sh. Amangeldi, Md. H. Ali, N. Badanova, A. Ashirbeok, G. Islam // IEEE Intern. Conf. on Advanced Manufacturing, Yunlin, Taiwan, 16–18 Nov. 2018. IEEE, 2018. P. 384–387.
doi: 10.1109/AMCON.2018.8615034

30. MatWeb. URL: <https://www.matweb.com> (дата обращения: 18.05.2025).

31. Агабеков В. Е., Потапов А. Л., Шахаб С. Н. Поляризаторы на основе поливинилового спирта и пленки с наночастицами серебра: получение и применение (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 6–35.

Информация об авторах

Федорова Лариса Олеговна – аспирантка второго года обучения кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), лаборант-исследователь группы "Фотофизика" отделения перспективных разработок НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ. Автор 16 научных работ. Сфера научных интересов: поляризационные материалы; поливиниловый спирт; шунгит; углеродные наночастицы; спектральные характеристики; нанотехнологии. Адрес: Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Орлова роща, д. 1, Гатчина, 188300, Россия
E-mail: loresafyoc@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-6753-4328>

Каманина Наталия Владимировна – доктор физико-математических наук (2001), начальник отдела "Фотофизика наноструктурированных материалов и устройств" АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова" (Санкт-Петербург), профессор (2001) кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (Гатчина). Автор более 340 научных работ. Сфера научных интересов: фотофизика; нанотехнологии; наночастицы и нанотрубки; полимеры; жидкие кристаллы; покрытия; взаимодействие излучения с веществом. Адрес: АО "НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова", ул. Бабушкина, д. 36, к. 1, Санкт-Петербург, 192174, Россия
E-mail: nvkamanina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

References

1. Shaw J. A., Vollmer M. Blue Sun Glints on Water Viewed Through a Polarizer. *Applied Optics*. 2017, vol. 56, no. 19, pp. 36–41.
doi: 10.1364/AO.56.000G36

2. Yang Z., Wang Z., Zhang J., Huang Ch., Zhang Q. Lightweight Visible Light Positioning for Wearables. *Mobile Computing and Communications*. 2015, vol. 19, no. 3, pp. 18–21.
doi: 10.1145/2867070.2867077

3. Mercatelli L. Examining Polarizing and Non-Polarizing Filters for Road Sports. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2023, vol. 5, art. no. 1236473.
doi: 10.3389/fspor.2023.1236473

4. Zhang Y., Wu J. Advanced Optical Polarizers Based on 2D Materials. *Nanophotonics*. 2024, vol. 1, no. 28, pp. 1–9.
doi: 10.1038/s44310-024-00028-3

5. Kakiuchida H., Ogiwara A. Stimuli-Responsive Light-Diffusing Polarizers Self-Assembled of Liquid Crystals and Polymers. *Advanced Optical Materials*. 2024, vol. 13, no. 8, art. no. 2402711.
doi: 10.1002/adom.202402711

6. Nahal A., Kiasatfar O. Self-Organized Nanograting: a Plasmonic Dichroic Polarizer. *Applied Physics A*. 2025, vol. 131, art. no. 346.
doi: 10.1007/s00339-025-08479-x

7. Hu Z., Ma Z., Peng M., He X., Zhang H., Li Y., Qiu J. Composite Film Polarizer Based on the Oriented Assembly of Electrospun Nanofibers. *Nanotechnology*. 2016, vol. 27, no. 13, art. no. 135301.
doi: 10.1088/0957-4484/27/13/135301

8. Yang Y., Forbes A., Cao L. A Review of Liquid Crystal Spatial Light Modulators: Devices, Technologies, and Applications. *Opto-Electronic Science*. 2023,

vol. 2, no. 3, art. no. 230026.

doi: 10.29026/oes.2023.230026

9. Suleiman G., Zeng X., Chakma R., Wakai I. Y., Feng Y. Recent Advances and Challenges in Thermal Stability of PVA-Based Film: a Review. *Polymers for Advanced Technologies*. 2024, vol. 35, iss. 2, art. no. e6327.

doi: 10.1002/pat.6327

10. Yang M., Wang Z., Li M., Yin Zh., Butt H. A. The Synthesis, Mechanisms, and Additives for Bio-Compatible Polyvinyl Alcohol Hydrogels: a Review on Current Advances, Trends, and Future Outlook. *J of Vynyl and additive technology*. 2022, vol. 29, no. 6, pp. 939–959.

doi: 10.1002/vnl.21962

11. Lihomanova S. V., Zvereva G. N., Kamanina N. V. Effect of UV Treatment on Optical and Surface Characteristics of Polyvinyl Alcohol Films Sensitized with Shungite. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2023, vol. 49, iss. 21, pp. 12–14. (In Russ.)

doi: 10.21883/PJTF.2023.21.56456.19664

12. Kamanina N. V., Tojkka A. S., Barnash Ya. V., Fedorova L. O., Tarkan R. M., Oshkolov M. A., Zubtcova Yu. A., Likhomanova S. V., Kuzhakov P. V. Effect of Transparency Increasing and Surface Relief of Polyvinyl Alcohol Thin Films with Graphene Oxide of Varied Concentrations: Possible Applications. *Liquid Crystals and their Application Russ. J.* 2023, vol. 23, no. 3, pp. 87–97. (In Russ.)

DOI: 10.18083/LCAppl.2023.3.87

13. Lihomanova S. V., Kamanina N. V. The Iodization Time Influence on Spectral and Polarization Characteristics of Polyvinyl Alcohol Polarizers. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2024, vol. 50, iss. 14, pp. 40–43. (In Russ.)

doi: 10.61011/PJTF.2024.14.58309.19891

14. Li Y., Xie J., Cheng H., Wei X., Chen J., You L., Chen W. Polyvinyl Alcohol-Based Polarizers for New Displays: Molecules, Processing and Properties. *Soft Matter*. 2025, vol. 21, iss. 17, pp. 3148–3167.

doi: 10.1039/d4sm01530d

15. Moriche R., Artigas-Arnaudas J., Chetwani B., Sánchez M., Campo M., Prolongo M. G., Rams J., Prolongo S. G., Ureña A. Microhardness and Wear Behavior of Nanodiamond-Reinforced Nanocomposites for Dental Applications. *Polymer Composites*. 2024, vol. 46, no. 3, pp. 2292–2303.

doi: 10.1002/pc.29104

16. Sharafeddin F., Shirani M., Jowkar Z. Assessing the Impact of Nano-Graphene Oxide Addition on Surface Microhardness and Roughness of Glass Ionomer Cements: A Laboratory Study. *Intern. J. of Dentistry*. 2024, vol. 2024, no. 1, art. no. 5597367.

doi: 10.1155/2024/5597367.

17. Sokolov V. A. *Geologiya i litologiya karbonatnykh porod srednego proterozoya Karelii* [Geology and Lithology of Carbonate Rocks of the Middle Proterozoic of Karelia]. Leningrad, AN SSSR, 1963, 183 p. (In Russ.)

18. Borisov P. A. *Karel'skie shungity* [Karelian Shungites]. Petrozavodsk, Gosizdat KFSSR, 1956, 92 p. (in Russ.)

19. Shlyanin A. N., Kayryak A. I., Kalinik Yu. K. *Shungity Karelii i puti ikh kompleksnogo ispolzovaniya* [Shungites of Karelia and Ways of Their Integrated Use]. Petrozavodsk, Karelia, 1975, 240 p. (In Russ.)

20. Sheka E. F., Rozhkova N. N. *Shungit – prirodnaya kladovaya nanorazmernogo vosstanovlennogo oksida grafena* [Shungite is a Natural Source of Nanoscale Reduced Graphene Oxide]. *Nanosistemy*. 2014, vol. 6, no 1, pp. 3–17. (In Russ.)

21. Xiao J., Han J., Zhang Ch., Ling G., Kang F., Yang Q.-H. Dimensionality, Function and Performance of Carbon Materials in Energy Storage Devices. *Advanced Energy Materials*. 2021, vol. 12, iss. 4, art. no. 2100775.

doi: 10.1002/aenm.202100775

22. Chou N., Pierce N., Lei Y., Perea-López N., Fujisawa K., Subramanian Sh., Robinson J. A., Chen G., Omichi K., Rozhkov S. S., Rozhkova N. N., Terrones M., Harutyunyan A. R. Carbon-rich Shungite as a Natural Resource for Efficient Li-Ion Battery Electrodes. *Carbon*. 2018, vol. 130, pp. 105–111.

doi: 10.1016/j.carbon.2017.12.109

23. Kovalchuk A. A., Prikhodko A. V., Konkov O. I., Rozhkova N. N. Graphene-Like Carbon of Shungite Rocks of Karelia as a Basis for Obtaining Nanostructured Films. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2018, no. 11, pp. 121–127. (In Russ.)

24. Shevchenko T. V., Ustinova Yu. V., Uzunov G. B. *Opredelenie biologicheskoy aktivnosti shungita* [Determination of the Biological Activity of Shungite]. *Novejshie dostizheniya v oblasti meditsiny, zdravookhraneniya i zdorov'esberegayushchikh tekhnologii*. Proc. of the 1st Intern. Congress. 2022, pp. 504–506. (In Russ.)

doi: 10.21603/I-IC-153

25. Tarasevich I. Yu., Bondarenko S. V. Study of Structural-Sorption and Electrochemical Properties of Natural Composite Material Shungite. *Colloid J.* 2008, no. 3, pp. 384–391. (In Russ.)

26. Pyrkin A. A., Lukutsova N. P., Kostyuchenko G. V. On the Issue of Improving the Properties of Fine-Grained Concrete with Micro- and Nano-Dispersed Additives Based on Shungite. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*. 2011, no. 2, pp. 16–20. (In Russ.)

27. Kamanina N. V., Vasiliev P. Ya., Studenov V. I. Polarizing Films for the Visible Range of Light with a Nanostructured Surface Based on Carbon Nanotubes and Nanofibers. Patent RU 2 498 373 C2. 2013. (In Russ.)

28. Huard S. *Polarization of Light*. New York, Wiley, 1997, 352 p.

29. Yerbolat G., Amangeldi Sh., Ali Md. H., Badanova N., Ashirbek A., Islam G. Composite Materials Property Determination by Rule of Mixture and Monte Carlo Simulation. *IEEE Intern. Conf. on Advanced Manufacturing*, Yunlin, Taiwan, 16–18 Nov. 2018. IEEE, 2018, pp. 384–387.

doi: 10.1109/AMCON.2018.8615034

30. MatWeb. Available at: <https://www.matweb.com>

(accessed: 18.05.2025).

31. Agabekov V. E., Potapov A. L., Shahab S. N. Polarizers based on polyvinyl alcohol and films with silver nanoparticles: production and application (review). *Polimernye materialy i tekhnologii*. 2015, no. 2, pp. 6–35. (In Russ.)

Information about the authors

Larisa O. Fedorova, Postgraduate student of the second year of study of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University, laboratory assistant researcher of the "Photophysics" group of the promising developments department of the Kurchatov Institute. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: polarizing materials; polyvinyl alcohol; shungite; carbon nanoparticles; spectral characteristics; nanotechnologies.

Address: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute", 1, Orlovskaya, Gatchina 188300, Russia

E-mail: loresafyoc@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-6753-4328>

Natalia V. Kamanina, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2001), Head of the Department of Photophysics of nanostructured materials and devices of Joint Stock Company "Research and Production Corporation n. a. S. I. Vavilov", Professor (2001) of the Department of Photonics of Saint Petersburg Electrotechnical University, Lead Researcher of the Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre "Kurchatov Institute". The author of 340 scientific publications. Area of expertise: photophysics; nanotechnology; nanoparticles and nanotubes; polymers; liquid crystals; coatings; interaction of radiation with matter.

Address: JSC S. I. Vavilov State Optical Institute, 36/1, Babushkina St., St Petersburg 192174, Russia

E-mail: nvkamanina@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

Алгоритм расчета выходного сигнала электретных емкостных преобразователей приемного типа

Д. А. Козодаев¹, Н. С. Пщелко², О. В. Посредник^{2✉}, Д. Е. Булычев³

¹NT-MDT BV LLC, Апелдорн, Нидерланды

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

³ООО "МЕДЭЛ", Санкт-Петербург, Россия

✉ovposrednik@etu.ru

Аннотация

Введение. Электретные емкостные преобразователи приемного типа с подвижными обкладками используются в различных устройствах, в частности в мобильных телефонах в качестве микрофонов. При этом методики расчета их чувствительности, в том числе с учетом параметров электрической нагрузки преобразователя и других особенностей, разработаны недостаточно. Результаты разработки предлагаемого алгоритма расчета будут полезны при проектировании новых и оптимизации имеющихся конструкций электретных преобразователей.

Цель работы. Разработка математической модели электретных сенсоров мембранного типа для оценки их чувствительности с учетом статического прогиба мембраны, особенностей механических колебаний под действием внешней периодической силы, которая может иметь различную природу, а также с учетом влияния электрической нагрузки.

Материалы и методы. Приведенные результаты получены с помощью компьютерного моделирования в среде MATLAB.

Результаты. Выполненный расчет условно разделен на три взаимосвязанных секции: в статической части расчета учитывается прогиб мембраны под действием электрического поля электрета, в динамической рассчитываются колебания мембраны под действием внешнего периодического возмущения, в электрической – электрическое напряжение, возникающее в результате на выводах преобразователя. Получены выражения для статического прогиба мембраны и определены границы ее устойчивого состояния в зависимости от параметров капсуля электретного преобразователя – натяжения мембраны, толщины воздушного рабочего зазора, толщины электретной пленки, ее относительной диэлектрической проницаемости, размеров мембраны и противозлектрода и др. Рассмотрена методика расчета колебаний, в которой используются эквивалентные сосредоточенные параметры (масса мембраны, действующие силы и др.) вместо распределенных, что позволяет избежать решения уравнений в частных производных.

Заключение. Выполненные расчеты позволяют обоснованно выбирать значения параметров электретных преобразователей в зависимости от предъявляемых к ним требований. Полученные выражения позволяют рассчитывать амплитудно-частотную характеристику электретных преобразователей-генераторов различных типов.

Ключевые слова: электреты, электретные преобразователи, сенсор, мембрана, электрическое поле, чувствительность, амплитудно-частотная характеристика

Для цитирования: Алгоритм расчета выходного сигнала электретных емкостных преобразователей приемного типа / Д. А. Козодаев, Н. С. Пщелко, О. В. Посредник, Д. Е. Булычев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 3. С. 99–111.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-99-111

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; принята к публикации после рецензирования 14.04.2026; опубликована онлайн 29.06.2026



Algorithm for Calculating the Output Signal of Electret Capacitive Transducers of the Receiving Type

Dmitry A. Kozodaev¹, Nikolay S. Pshchelko²,
Olesya V. Posrednik²✉, Daniil E. Bulychev³

¹NT-MDT BV LLC, Apeldoorn, the Netherlands

²Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

³MEDEL LLC, Saint Petersburg, Russia

✉ovposrednik@etu.ru

Abstract

Introduction. Electret capacitive receiving transducers with moving plates are used in various devices, particularly as microphones in mobile phones. However, methods for calculating their sensitivity, including taking into account the electrical load parameters and other characteristics of such transducers, are insufficiently developed.

Aim. To develop a mathematical model of membrane-type electret sensors for evaluating their sensitivity, taking into account the static deflection of the membrane, the characteristics of mechanical vibrations under the influence of an external periodic force of various origins, and the influence of the electrical load.

Materials and methods. Computer simulation in the MATLAB environment.

Results. The proposed calculation procedure is divided into three interconnected stages. The static stage accounts for membrane deflection under the influence of the electret-induced electric field. The dynamic stage describes membrane vibrations caused by an external periodic disturbance. The electrical stage determines the resulting electrical voltage at the transducer terminals. Analytical expressions for the static deflection of the membrane are derived, and the limits of its steady state are determined as functions of the parameters of the electret transducer capsule, including membrane tension, air gap thickness, electret film thickness, relative permittivity of the electret material, membrane and counter-electrode dimensions, etc. The technique for calculating membrane vibrations uses equivalent lumped parameters (membrane mass, acting forces, etc.) instead of distributed parameters, thereby eliminating the need to solve partial differential equations.

Conclusion. The proposed calculation procedure provides a basis for the rational selection of electret transducer parameter values depending on the target performance requirements. The derived expressions enable the calculation of the amplitude–frequency characteristics of various electret transducer generators. The results obtained are useful for those designing new and optimizing existing electret transducer designs.

Keywords: electrets, electret transducers, sensor, membrane, electric field, sensitivity, amplitude–frequency characteristic

For citation: Kozodaev D. A., Pshchelko N. S., Posrednik O. V., Bulychev D. E. Algorithm for Calculating the Output Signal of Electret Capacitive Transducers of the Receiving Type. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 99–111.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-99-111

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

Submitted 10.02.2026; accepted 14.04.2026; published online 29.06.2026

Введение. В настоящее время электретные сенсоры (ЭС) получили широкое распространение в технике в связи с простотой их устройства, чувствительностью к различным физическим воздействиям и невысокой стоимостью.

Разновидностью электретных сенсоров являются ЭС, в которых электроды, играющие роль обкладок конденсатора, подвижны и спо-

собны, например, вибрировать под действием внешних синусоидально изменяющихся сил. Электретами называются материалы, способные длительно (годами) сохранять созданный в них заряд. Принцип действия таких ЭС основан на возникновении электрического сигнала, появляющегося при механическом смещении подвижной обкладки – мембраны, вызывающем

изменение напряженности электрического поля в зазоре между электретом и мембраной. ЭС этого типа находят все большее применение в различных областях техники [1–6]. Например, в настоящее время более 90 % выпускаемых в мире микрофонов являются электретными. В связи с активным развитием MEMS-технологий, направленных на создание микроминиатюрных механических структур, получаемых в едином планарном кремниевом процессе одновременно с изготовлением микросхем, ведутся работы по созданию микроминиатюрных ЭС, в которых в качестве электрета используется диоксид кремния [2]. Данная технология на сегодняшний день окончательно не создана в связи с неустойчивостью электретного заряда во влаге. В то же время разработка приемлемой для производства указанной технологии является очень привлекательной, в связи с чем ведутся исследования, направленные также на разработку новых технологий их получения [2, 4, 7–10], неразрушающих методов контроля ЭС, расчета их чувствительности [11–17] и для решения других технологических задач, связанных с накоплением и использованием заряда в диэлектриках [18–21].

Уникальность использования электретов в сенсорах заключается еще и в том, что такие сенсоры могут не только не потреблять энергию в работе, но и даже вырабатывать ее, хотя и в небольшом, как правило, количестве, что актуально для различных энергоэкономных систем с автономным питанием. Использование электретных емкостных сенсоров позволит удешевить и улучшить характеристики многих устройств, в которых для создания электрического поля традиционно используются внешние источники питания.

Основные характеристики капсулей электретных преобразователей. Прежде чем перейти непосредственно к расчету, остановимся на такой важной характеристике электрета, как его поверхностный потенциал и методах его определения. Наиболее распространенным и широко применяемым методом измерения поверхностного потенциала является метод вибрирующего электрода. Он основан на появлении электрического тока смещения при изменении напряженности электрического поля. Для реализации метода к заряженной поверхности

электрета подносят вибрирующий электрод. Эта вибрация может быть получена, например, если этот электрод наклеить на диффузор динамика, подключенного к переменному напряжению.

При этом за счет изменения расстояния от электрода до поверхности электрета (из-за вибрации) изменяется напряженность электрического поля в зазоре между этим электродом и электретом и возникает электрический сигнал. Его можно скомпенсировать, подав на вибрирующий электрод потенциал, создающий электрическое поле противоположного направления. Соответственно, рассмотренная схема должна быть усовершенствована – в нее необходимо добавить источник компенсирующего напряжения (с возможностью изменения его полярности в зависимости от знака заряда электрета) и присоединенный к нему вольтметр. При компенсации сигнал в цепи исчезнет, так как напряженность электрического поля между поверхностью электрета и вибрирующим электродом станет равна нулю. Зафиксировав значение поданного потенциала, можно, следовательно, измерить поверхностный потенциал электрета. Поскольку метод является компенсационным, он отличается высокой точностью.

Недостатком рассмотренного метода является необходимость изготовления некоторых электромеханических узлов, а также необходимость усиления измеряемого сигнала из-за его малой величины. Далее предлагается разработанная в этой связи установка для измерения бесконтактным способом поверхностного потенциала, лишенная указанных недостатков (рис. 1).

Принцип работы установки заключается в следующем. Под действием электрического поля (ЭП) заряженного диэлектрика, подносимого к затвору полевого транзистора, изменяется потенциал затвора и, следовательно, сопротивление канала между истоком и стоком полевого транзистора. При этом выходная цепь транзистора используется в качестве одного из плеч моста Уинстона и при изменении этого сопротивления под действием ЭП электрета происходит разбаланс моста.

В результате в диагонали предварительно уравновешенного моста появляется электрический сигнал. Если с источника постоянного напряжения (РИП) подать напряжение соответствующей полярности, как показано на рис. 1,

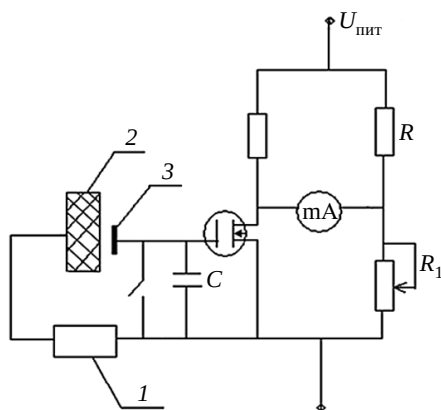


Рис. 1. Схема на основе полевого транзистора, не содержащая подвижных элементов и позволяющая измерять поверхностный потенциал электрета:
1 – регулируемый источник постоянного напряжения;
2 – электрет; 3 – затвор полевого транзистора

Fig. 1. A circuit based on a field-effect transistor with no moving parts that allows the surface potential of an electret to be measured: 1 – adjustable DC voltage source; 2 – electret; 3 – field-effect transistor gate

то можно скомпенсировать ЭП, создаваемое электретом. Таким образом, можно скомпенсировать разбаланс моста и по измеренному значению поданного напряжения определить значение и знак поверхностного потенциала электрета: поданное напряжение будет противоположно по знаку и равно по модулю поверхностному потенциалу электрета.

Электрически заряжая диэлектрик и затем контролируя спад поверхностного потенциала во времени, можно, в частности, не только получить информацию о самом электрете, но и выявить различные внешние факторы, влияющие на этот спад, например влажность, радиационный фон и др.

Методика расчета. Обзор методов расчета электростатических сенсоров мембранного типа, в том числе ЭС (их конструкция в общем виде представлена на рис. 2) был выполнен в [6]. Точное решение, описывающее поведение мембраны под действием внешних сил, которые могут иметь как постоянную, так и переменную составляющие, может быть получено на основе волнового уравнения:

$$\rho_s \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \tau \left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 y}{\partial \theta^2} \right) + p(r, \theta, t), \quad (1)$$

где ρ_s – поверхностная плотность мембраны; τ – ее натяжение; $p(r, \theta, t)$ – давление, обусловлен-

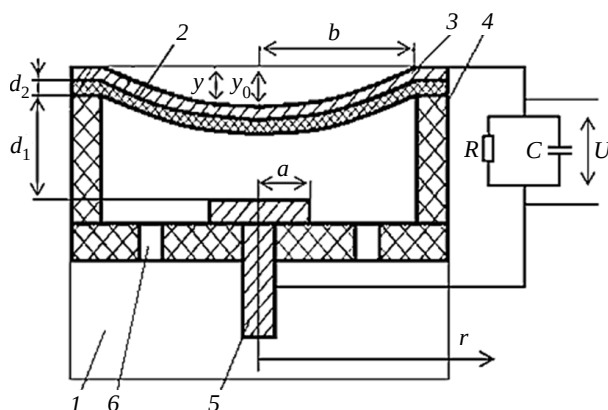


Рис. 2. Электретный преобразователь приемного типа с мембраной-электретом: 1 – замкнутая полость, сообщающаяся с воздушным рабочим зазором; 2 – пленочный электрет – мембрана радиусом b ; 3 – слой металлизации; 4 – прокладка для обеспечения воздушного зазора из диэлектрического твердого материала; 5 – противозлектрод радиусом a ; 6 – отверстия в противозлектроде

Fig. 2. Electret transducer of the receiving type with an electret membrane: 1 – closed cavity communicating with the working air gap; 2 – film electret membrane of radius b ; 3 – metallization layer; 4 – gasket for providing an air gap made of a dielectric solid material; 5 – counter electrode of radius a ; 6 – holes in the counter electrode

ное действием электростатических сил, создаваемых ЭП электрета (пондеромоторное давление), действующее на элемент площади мембраны и зависящее, вообще, от времени t и координат r, θ . Из-за сложности решения уравнения (1) в общем случае в ряде работ предлагается электростатические силы и связанные с ними прогибы мембран рассчитывать, исходя из того, что мембрана имеет сосредоточенные в точке параметры (эффективная масса, эффективные силы и др.). Эти параметры находятся по определенным правилам – из условия равенства работ, совершаемых реальными силами и эффективными.

Точное решение (1) в общем случае затруднительно в связи с тем, что данное уравнение может оказаться в системе других уравнений (например, уравнений механики) в частных производных. Оптимальным с точки зрения соотношения точности и сложности решения является аппроксимация, при использовании которой предполагается, что мембрана при прогибе имеет форму, близкую к куполообразной [6] (рис. 2). В таком случае прогиб мембраны (y) на расстоянии r от центра мембраны рассчитывается как

$$y = y_0 \left(1 - \frac{r^2}{b^2} \right), \quad (2)$$

где y_0 – прогиб мембраны в центре; b – радиус мембраны. Тогда, подставив (2) в (1), можно в большинстве практических случаев избежать решения уравнений в частных производных. Выражение (2) называется квадратичным приближением при описании прогибов натянутых мембран.

Хотя (2) – достаточно точная аппроксимация, при ее использовании расчетные значения электростатических сил оказываются несколько завышены [6]. Точное выражение критерия устойчивости мембраны (ситуации, когда силы упругой реакции мембраны еще могут компенсировать электростатические, создаваемые ЭП электрета, и мембрана не заливает на противоэлектрод), полученное численными методами на основе (1), имеет вид [6]

$$KU_z^2 = 0.789, \quad (3)$$

где K – коэффициент, зависящий от параметров ЭС; U_z – предельное значение напряжения U , соответствующее границе устойчивости мембраны. Чтобы отличать точное решение от решения, полученного с использованием квадратичного приближения, в последнем случае вместо напряжения U и поверхностного потенциала электрета U_E в [6] предложено писать U^* и U_E^* (эффективные значения потенциалов). Тогда критерий устойчивости имеет вид

$$KU_z^{*2} = 0.5. \quad (4)$$

Для наиболее эффективного использования ЭП электрета большинство ЭС работают в режиме, близком к границе устойчивости мембраны. Поэтому указанное в (4) можно распространить не только на U_z , но и на другие значения U , меньшие чем U_z , но достаточно близкие к ним. Поэтому, чтобы учесть обстоятельство, связанное с завышением электростатических сил при использовании (2), в дальнейших расчетах будем использовать эффективные значения электрических потенциалов – коэффициент $0.789 \approx 0.8$, указанный в (3):

$$\begin{aligned} U^* &= 0.8U; \\ U_E^* &= 0.8U_E. \end{aligned} \quad (5)$$

Использование эффективных значений массы, сил [12] и введенных в (5) эффективных электрических напряжений позволяет сильно упростить расчеты при сохранении высокой точности решения, близкой к получаемой на основе волнового уравнения (1), по крайней мере, на частотах, не сильно превышающих частоту основного резонанса колебаний мембраны. При использовании предлагаемого подхода колебания мембраны ЭС будут аналогичны колебанию груза на невесомой пружине. Учитывая указанное, в [12] была определена эффективная пондеромоторная сила (F_{Π}^*) для случая, когда радиус противоэлектрода (a) равен радиусу мембраны (b) (рис. 1):

$$\begin{aligned} F_{\Pi}^* &= \frac{\pi b^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 (U_E^* + U^*)^2}{2y_0^2} \times \\ &\times \left(\frac{\varepsilon_2 y_0}{A - \varepsilon_2 y_0} - \ln \frac{A}{A - \varepsilon_2 y_0} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

При этом так называемый приведенный зазор A рассчитывается по формуле

$$A = \varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1, \quad (7)$$

где $\varepsilon_1 \approx 1$ – диэлектрическая проницаемость воздушного зазора толщиной d_1 между мембраной и противоэлектродом; d_2 – толщина мембраны (электрета) с диэлектрической проницаемостью ε_2 .

Статический прогиб мембраны y_0 в центре может быть определен из условия равенства силы упругой реакции мембраны и силы электростатического притяжения мембраны к противоэлектроду, т. е. из совместного решения выражения для эффективной упругой силы

$$F_{el}^* = 2\pi\tau y_0, \quad (8)$$

где τ – натяжение мембраны, и выражения (6). Такой метод расчета позволяет легко определять значение статического прогиба мембраны под действием ЭП электрета.

В [6] было показано, что при описании колебаний мембраны в мембранных ЭС можно использовать уравнение

$$m^* \frac{d^2 y_0}{dt^2} = \frac{\pi b^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 (U_E^* + U^*)^2}{2 y_0^2} \times$$

$$\times \left(\frac{\varepsilon_2 y_0}{A - \varepsilon_2 y_0} - \ln \frac{A}{A - \varepsilon_2 y_0} \right) - 2 \pi \tau y_0 \pm$$

$$\pm F_H^* - 2k \frac{dy_0}{dt}, \quad (9)$$

где F_H^* – эффективная сила нагрузки; k – показатель затухания, связанный с трением.

Эффективная масса колеблющейся мембраны, использованная в (9), рассчитывается как [11, 12]

$$m^* = \frac{1}{3} \rho_v d_2 \pi b^2, \quad (10)$$

где ρ_v – объемная плотность материала, из которого изготовлена мембрана; d_2 – толщина мембраны.

Колебания будут возникать, если $U = U(t)$ или если действующая внешняя сила – периодическая. В первом случае электрестный преобразователь является актюатором, во втором – сенсором (приемником) или генератором электрического сигнала. В настоящей статье будет рассмотрен только второй из указанных случаев.

Статистическая часть расчета. Рассмотрим ЭС как двухслойный конденсатор и вычислим напряженность ЭП, создаваемую внешним напряжением U в его воздушном зазоре и поверхностным потенциалом электрета U_E . Соответствующие расчеты приводят к выражению

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2 (U + U_E)}{A - \varepsilon_2 y(r)}. \quad (11)$$

При этом учтем, что пондеромоторное давление $p(r, \theta, t)$, действующее на мембрану, рассчитывается по формуле

$$p = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_1^2. \quad (12)$$

На основе (1), (7), (11) и (12) сделаем вывод, что выражение (1) с учетом введенного понятия эффективных электрических потенциалов в стационарном случае сводится к

$$\tau \left(\frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} \right) =$$

$$= - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_E^* + U^*)^2}{2} \frac{1}{(A - \varepsilon_2 y)^2}. \quad (13)$$

Далее используем аппроксимацию (2) в выражении (13) и проинтегрируем полученное уравнение. При этом левую часть необходимо интегрировать от 0 до b , так как это по физическому смыслу сила упругости мембраны, а правую – от 0 до a , так как это электростатическая сила. Прделав указанные операции, получим связь статического прогиба y_{ost} мембраны ЭС в ее центре с приложенным электрическим напряжением и параметрами ЭС:

$$4 \varepsilon_2^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_{ost}^3 - 4 \varepsilon_2 A \left(2 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_{ost}^2 +$$

$$+ 4 A^2 y_{ost} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_E^* + U^*)^2}{2 \tau} = 0. \quad (14)$$

В случае $a = b$ уравнение (14) переходит в квадратное уравнение, из которого в [12] было найдено, что статический прогиб мембраны в центре под действием электростатических сил вычисляется по аналитическому выражению

$$y_{ost} = \frac{A^2 \pm \sqrt{A^4 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^3 (U_E^* + U^*)^2 \frac{A a^2}{2 \tau}}}{2 \varepsilon_2 A}. \quad (15)$$

В (15) меньшее значение y_{ost} соответствует устойчивому равновесию мембраны, которое и реализуется в реальных ЭС.

В случае $b \neq a$ ($b > a$) уравнение (14) имеет три корня, один из которых соответствует положению устойчивого равновесия мембраны, второй – неустойчивого. Третий не имеет физического смысла. Для нахождения решения (14), соответствующего положению устойчивого равновесия, реализуемого в ЭС, выразим из (14) y_{ost} :

$$y_{ost} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_E^* + U^*)^2 a^2}{8 \tau A^2} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_2 \left(2 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_{ost}^2}{A} - \frac{\varepsilon_2 \left(2 - \frac{a^2}{b^2} \right) y_{ost}^3}{A^2}. \quad (16)$$

К полученному выражению применим процедуру Зейделя, при начальном значении y_{ost} , равном нулю, будем искать корень как бы в

хронологическом порядке: в первый момент после создания ЭП мембрана еще не прогнута, а с каждой последующей итерацией в (16) прогиб будет увеличиваться, достигая в итоге равновесного значения. Отметим, что так как в статическом режиме эффективные значения пондеромоторной и электростатической сил равны ($F_{el}^* = F_{\pi}^*$), то F_{el}^* проще вычислить по (8) после определения из (16) значения y_{ost} , соответствующего устойчивому равновесию. При этом следует иметь в виду, что эффективная (сосредоточенная в центре мембраны) сила вдвое меньше ее реального значения [12] (распределенной по поверхности мембраны силы). Поэтому реальное значение искомых сил вдвое больше, чем по (8).

Динамическая часть расчета. Ранее отмечалось, что при известной внешней силе, вызывающей колебания, представленную на рис. 2 систему с распределенными элементами массы, упругости, трения можно заменить при расчете эффективными сосредоточенными параметрами [12]. Уравнение движения центра мембраны тогда будет аналогично уравнению колебаний пружинного маятника:

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} + 2k \frac{dy_0}{dt} + \omega_0^2 y_0 = \frac{F^*}{m^*}, \quad (17)$$

где $y_0 = y_0(t)$; ω_0 – собственная циклическая частота колебаний мембраны; F^* – эффективная сила, действующая на мембрану, для измерения которой непосредственно или опосредованно, по сути, и предназначен ЭС.

Эффективная сила, действующая на мембрану, имеет постоянную и переменную составляющие:

$$F^* = F_{\pi}^* + F_{vm}^* \sin \omega t, \quad (18)$$

где F_{π}^* – эффективная пондеромоторная сила, действующая на мембрану, вследствие существования значительного внешнего ЭП электрета; F_{vm}^* – амплитуда эффективной внешней силы, возбуждающей колебания; ω – циклическая частота возбуждающей силы.

Совместно решив (17) и (18), получим для

$k < \omega_0$ (демпфирование действительно обычно мало в реальных ЭС):

$$y_0 = C_1 e^{-kt} \sin(\Omega t + \Psi_1) + \frac{F_{vm}^* \sin(\omega t + \Psi_2)}{m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} + \frac{F_{\pi}^*}{m^* \omega_0^2}, \quad (19)$$

где C_1 и Ψ_1 – постоянные; $\Omega = (\omega_0^2 - k^2)^{1/2}$;

$$\Psi_1 = \arctg \frac{2k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Собственная циклическая частота колебаний механической системы, подобной пружинному маятнику: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{el}^*}{m^*}}$, где k_{el}^* – эф-

фективный коэффициент упругости. Поэтому последнее слагаемое в (19) может быть представлено в виде F_{π}^*/k_{el}^* . Очевидно, эта величина в рамках закона Гука представляет собой статический прогиб y_{ost} центра мембраны под действием пондеромоторных и упругих сил. В данной статье ограничимся рассмотрением установившегося процесса. Первое слагаемое в (19), как показывает анализ, быстро исчезает с течением времени. Учитывая это, можно считать, что

$$y_0 = y_{ost} + \frac{F_{vm}^*}{m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \sin(\omega t + \Psi_2), \quad (20)$$

где y_{ost} вычисляется по процедуре (16). В часто встречающемся на практике случае $a = b$ величина y_{ost} может быть вычислена аналитически по (15), причем необходимо взять меньшее из двух возможных при этом значений y_{ost} .

Электрическая часть расчета. Колебания мембраны приводят к изменению напряженности ЭП в рабочем зазоре. Это вызывает изменение величины индуцируемого на противоэлектроте заряда $Q_{ind} = \pi a^2 \sigma_{ind}$, где σ_{ind} – поверхностная плотность индуцируемого заряда. Появление избыточного над равновесным заряда приводит к возникновению тока смещения

dQ_{ind}/dt . Поэтому с учетом показанной на рис. 2 нагрузки:

$$C \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = \pi a^2 \frac{d\sigma_{\text{ind}}}{dt}, \quad (21)$$

где $C = C + C_0$ – полная емкость, через которую течет реактивная составляющая возникающего тока (состоит из емкости нагрузки и собственной емкости ЭС); R – омическое сопротивление нагрузки.

Величину σ_{ind} , создаваемую рассматриваемым ЭП, найдем с помощью теоремы Гаусса с учетом (11). Для расчетов понадобится определить средний по площади электрода прогиб мембраны:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a y(r) 2\pi r dr = \\ &= \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a y_0 \left(1 - \frac{r^2}{b^2}\right) 2\pi r dr = y_0 \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right). \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда

$$\sigma_{\text{ind}} = 0 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1 = -\varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_0 (U_E + U)}{A - \varepsilon_2 \bar{y}}. \quad (23)$$

Подставив (23) в (21), найдем производную $d\sigma_{\text{ind}}/dt$, учитывая, что в (23) $U = U(t)$ и $\bar{y} = \bar{y}(t)$. После преобразований получим уравнение

$$\begin{aligned} \left(C + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \pi a^2}{A - \varepsilon_2 \bar{y}} \right) \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R} = \\ = - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (U_E + U) \pi a^2}{(A - \varepsilon_2 \bar{y})^2} \frac{d\bar{y}}{dt}. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{Входящая в (24) величина } \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \pi a^2}{A - \varepsilon_2 \bar{y}} = C_0$$

представляет собой собственную электрическую емкость ЭС. Учитывая, что реально $|U| \ll |U_E|$, и обозначив $C_0 + C = C_\Sigma$, уравнение (24) можно переписать в виде

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC_\Sigma} U = - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_E \pi a^2}{(A - \varepsilon_2 \bar{y})^2 C_\Sigma} \frac{d\bar{y}}{dt}. \quad (25)$$

Отметим также, что для реальных ЭС оказывается, что переменная составляющая в правой части (25) в знаменателе значительно меньше постоянной A . Исходя из этого, подставим (20) с учетом (22) в (25). Получим для сигнала на выходе ЭС дифференциальное уравнение:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{1}{RC_\Sigma} U = B \cos(\omega t + \Psi_2). \quad (26)$$

Здесь

$$\begin{aligned} B = \\ = - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_E \pi a^2 \omega F_{\text{vm}}^*}{m^* C_\Sigma \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (A - \varepsilon_2 \bar{y}_{\text{st}})^2} \times \\ \times \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right), \end{aligned} \quad (27)$$

где $\bar{y}_{\text{st}}$ – средний по площади противоэлектрода статический прогиб мембраны.

Решив (26), получим:

$$\begin{aligned} U = C_2 \exp\left(-\frac{t}{RC_\Sigma}\right) + \\ + B \frac{RC_\Sigma}{1 + \omega^2 R^2 C_\Sigma^2} \sin(\omega t + \theta), \end{aligned} \quad (28)$$

где C_2 – постоянная; $\theta = 1/(\omega RC_\Sigma)$.

Аналогично тому, как и при рассмотрении механических колебаний, будем рассматривать только установившиеся электрические колебания. Тогда первое слагаемое в (28) можно не учитывать, и из (27) и (28) следует, что на RC-нагрузке амплитуда выходного сигнала будет

$$\begin{aligned} U_m = \\ = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_E \pi a^2 F_{\text{vm}}^* R}{m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (A - \varepsilon_2 \bar{y}_{\text{st}})^2 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_\Sigma^2}} \times \\ \times \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right). \end{aligned} \quad (29)$$

Поскольку F_{vm}^* может иметь любую природу, полученная формула пригодна для широкого круга ЭС-приемников различного назначения (генераторов электрического сигнала).

Примеры расчетов. Рассмотрим использование (29) для расчета чувствительности электретного микрофона. Формулу для расчета его чувствительности можно получить из (29), если учесть, что $F_{vm}^* = \sqrt{2} \cdot F_v^*$. Тогда при равномерной нагрузке мембраны силой F_v , как уже отмечалось, оказывается, что $F_v^* = F_v/2$ [12], где F_v – реальное действующее значение силы, возбуждающей колебания мембраны ЭС. Для электретного микрофона $F_v = p_a \pi b^2$, где p_a – акустическое давление, оказываемое извне на мембрану. Тогда, с учетом того, что эффективная сила вдвое меньше реальной:

$$F_{vm}^* = \frac{\sqrt{2}}{2} p_a \pi b^2. \quad (30)$$

Подставив (30) в (29), найдем, что чувствительность микрофона

$$S = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot p_a} = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_E \pi^2 a^2 b^2 R}{2 m^* \sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2 (A - \varepsilon_2 \bar{y}_{st})^2 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_\Sigma^2}}} \times \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right). \quad (31)$$

Для вычислений необходимо знать собственную циклическую частоту колебаний мембраны ω_0 . В [12] было показано, что

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m^*} \left(2\pi\tau + \frac{\gamma p_0 (\pi b^2)^2}{4V} \right)}, \quad (32)$$

где $\gamma = 1.4$ – отношение удельных теплоемкостей C_p/C_V ; $p_0 = 10^5$ Па – атмосферное давление; V – объем воздушной полости (см. рис. 2).

Величина k в мембранных ЭС составляет около 30 % от ω_0 [1]. Поэтому примем, что $k = \alpha \omega_0$, где $\alpha \approx 0.3$. Для расчетов необязательно знать точное значение α , так как демпфирование влияет на результаты расчета лишь при частотах, близких к резонансным. Расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) электретного микрофона МКЭ-100 на основе (31)

хорошо соответствует паспортным данным и экспериментально наблюдаемым значениям.

Рассмотрим пример того, как можно использовать рассмотренные подходы при проектировании и расчете новых ЭС. Выполним расчет электретного акселерометра (датчика вибраций). Принцип его действия основан на том, что на мембрану ЭП (см. рис. 2), в случае жесткого закрепления его на вибрирующей поверхности, как на любое тело, находящееся в неинерциальной системе отсчета, будет действовать сила инерции F_i , равная произведению массы на ускорение:

$$F_i = m^* \omega^2 x,$$

где ω – циклическая частота колебаний; x – смещение мембраны от положения равновесия. Тогда получим, что для расчета выходного напряжения в (29) в качестве F_{vm}^* следует подставлять выражение

$$F_{vm}^* = m^* \omega^2 x_m,$$

где x_m – амплитуда исследуемых вибраций. Поэтому окончательное выражение для величины вырабатываемого сигнала в рассматриваемом случае примет вид

$$U_m = \frac{\omega^3 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 U_E \pi a^2 x_m R}{\sqrt{4k^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2 (A - \varepsilon_2 \bar{y}_{st})^2 \sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_\Sigma^2}}} \times \left(1 - \frac{a^2}{2b^2}\right). \quad (33)$$

В (33) значение среднего статического прогиба рассчитывается из (16) с учетом (22).

Для повышения чувствительности датчика на низких частотах утяжелем мембрану в ее центре так, чтобы ее массу можно было считать сосредоточенной в центре. При этом утяжеление, однако, не должно быть слишком большим, так как ранее в расчетах не учитывалась сила тяжести, действующая на мембрану по причине того, что электростатические и упругие силы имеют существенно большие значения. В этом можно убедиться, используя (8), согласно которой при разумных значениях натяжения мембраны и ее прогиба получаются

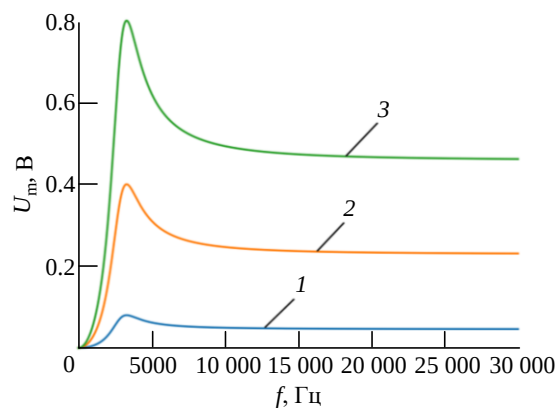


Рис. 3. Зависимость амплитуды электрического сигнала, вырабатываемого электретным датчиком вибраций от частоты $f = \omega/(2\pi)$ вибраций при их различных амплитудах: 1 – $x_m = 0.1$ мкм; 2 – $x_m = 0.5$ мкм; 3 – $x_m = 1$ мкм; $\alpha = 0.3$; $C = 8 \cdot 10^{-12}$ Ф; $m^* = 10^{-4}$ кг; $\tau = 80$ Н/м; $\gamma = 1.4$; $p_0 = 105$ Па; $a = 7$ мм; $b = 1$ см; $V = 0.1$ см³; $d_1 = 100$ мкм; $d_2 = 10$ мкм; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\epsilon_1 = 1$; $\epsilon_2 = 2.5$; $\bar{y}_{st} = 1.30$ мкм; $U_E = 100$ В; $R = 100$ МОм

Fig. 3. Dependence of the amplitude of the electrical signal generated by an electret vibration sensor on the frequency $f = \omega/(2\pi)$ of vibrations at their different amplitudes: 1 – $x_m = 0.1$ μ m; 2 – $x_m = 0.5$ μ m; 3 – $x_m = 1$ μ m; $\alpha = 0.3$; $C = 8 \cdot 10^{-12}$ F; $m^* = 10^{-4}$ kg; $\tau = 80$ N/m; $\gamma = 1.4$; $p_0 = 105$ Pa; $a = 7$ mm; $b = 1$ cm; $V = 0.1$ cm³; $d_1 = 100$ μ m; $d_2 = 10$ μ m; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m; $\epsilon_1 = 1$; $\epsilon_2 = 2.5$; $\bar{y}_{st} = 1.30$ μ m; $U_E = 100$ V; $R = 100$ MOhm

силы порядка $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Н, и с помощью (10) для массы мембраны, согласно которой при разумных значениях используемых величин получится значение массы по порядку величины 10^{-5} кг, а сила тяжести, соответственно, имеет порядок 10^{-4} Н. Таким образом, с учетом сделанных замечаний представляется целесообразным принять массу мембраны с утяжеленным центром равной по порядку величины 10^{-4} кг и считать ее сосредоточенной в центре мембраны, т. е. в этом случае в (32) $m^* = m$.

На рис. 3 представлены некоторые результаты расчета по (33) для рассматриваемого примера. При этом статический прогиб мембраны в ее центре заранее рассчитывался по (16) и пересчитывался на среднее по площади значение по (22).

Заключение. Выполненные расчеты позволяют обоснованно выбирать значения параметров электретных преобразователей в зависимости от предъявляемых к ним требованиям. В частности, возможно определение безопасных с точки зрения залипания мембраны на противоэлектрод значений параметров капсуля преобразователя. На основе полученных выражений рассчитана величина вырабатываемого электретным преобразователем электрического сигнала с учетом значений электрической емкости и сопротивления нагрузки. Полученные выражения позволяют рассчитывать амплитудно-частотную характеристику электретных преобразователей-генераторов различных типов. Представляется, что результаты будут полезны при проектировании новых и оптимизации имеющихся конструкций электретных преобразователей. Ранее предполагалось, что $a = b$ (см. рис. 1). Вместе с тем технология изготовления мембранных ЭС зачастую такова, что $b > a$. Более того, в [5] было показано, что именно при $b > a$ возможно получение наибольшей чувствительности ЭС. Проведенные расчеты АЧХ электретного микрофона и датчика вибраций хорошо соответствуют экспериментально полученным значениям. Поэтому есть основания надеяться, что разработанная методика окажется полезной при конструировании новых ЭС и оптимизации известных конструкций.

Дальнейшие исследования будут продолжены в направлении разработки компьютерной программы, позволяющей рассчитывать амплитудно-частотную характеристику ЭС-приемника.

Авторский вклад

Козодаев Дмитрий Александрович – постановка задачи; научное руководство; анализ полученных результатов; консультации.

Пшелко Николай Сергеевич – научное руководство; разработка алгоритма расчета; сбор и анализ данных; выполнение расчетов; написание и редактирование статьи.

Посредник Олеся Валерьевна – сбор данных; редактирование статьи; выполнение расчетов.

Булычев Даниил Егорович – сбор данных; выполнение расчетов.

Author's contribution

Dmitry A. Kozodaev, problem formulation; scientific supervision; analysis of results; consultations.

Nikolai S. Pshchelko, scientific supervision; calculation algorithm development; data collection and analysis; calculations; article writing and editing.

Olesya V. Posrednik, data collection; article editing; calculations.

Daniil E. Bulychhev, data collection; calculations.

Список литературы

1. Sessler G. M., West J. E. Electret transducers: a review // J. of the Acoustical Society of America. 1973. Vol. 53, iss. 6. P. 1589–1600. doi: 10.1121/1.1913507
2. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. Козин, А. Федулов, В. Пауткин, И. Баринов // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 24–27.
3. Sessler G. M. Analysis of the operation of electret transducers subject to large electrode displacements // J. of the Acoustical Society of America. 1974. Vol. 55, № 2. P. 345–349. doi: 10.1121/1.1914509
4. Kestelman V. N., Pinchuk L. S., Goldade V. A. Electrets in Engineering: Fundamentals and Applications. New York: Springer, 2000. 281 p. doi: 10.1007/978-1-4615-4455-5
5. Рычков А. А., Бойцов В. Г. Электретный эффект в структурах полимер-металл. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2000. 250 с.
6. Saveliyev A., Pshchelko N., Krestovnikov K. Method of Sensitivity Calculation for Electrete Diaphragm Capacitive Sensors // 12th Intern. Conf. on Developments in eSystems Engineering, Kazan, Russia, 07–10 Oct. 2019. IEEE, 2019. P. 486–490. doi: 10.1109/DeSE.2019.00134
7. Луцкейкин Г. А. Электретный эффект в полимерах. Достижения в получении и применении электретов // Успехи химии. 1983. Т. 52, № 8. С. 1410–1431.
8. Гороховатский Ю. А. Электретный эффект и его применение // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 8. С. 92–98.
9. Пинчук Л. С., Гольдаде В. А. Электретные материалы в машиностроении. Гомель : Инфотрибо, 1998. 288 с.
10. Pshchelko N. S., Sokolova I. M., Zakrzhevskiy V. I. C-V – Testing of Electret Transducers // Proc. of 8th Intern. Symp. on Electrets, Paris, France, 07–09 Sept. 1994. IEEE, 1994. P. 1028–1033. doi: 10.1109/ISE.1994.515266
11. Фурдуев В. В. Электроакустика. М., Л.: Гостехиздат, 1948. 517 с.
12. Pshchelko N. S., Tairov V. N. Procedure for the calculation of electret receiving electroacoustic transducers // Soviet physics acoustics. 1988. Vol. 34, iss. 4. P. 406–408.
13. The Percolation Behavior of Electret at Presence of Water Condensation / U. I. Kuzmin, N. S. Pshchelko, I. M. Sokolova, V. I. Zakrzhevskiy // Proc. of 8th Intern. Symp. on Electrets, Paris, France, 07–09 Sept. 1994. IEEE, 1994. P. 124–129. doi: 10.1109/ISE.1994.514755
14. Busch-Vishniac I. J. Response of an edge-supported circular membrane electret earphone. Pt. I: Theory // J. of the Acoustical Society of America. 1984. Vol. 75, № 3. P. 977–989. doi: 10.1121/1.390564
15. Kozodaev D. A., Pshchelko N. S., Zakrzhevskiy V. I. Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones // 10th Intern. Symp. on Electrets, Athens, Greece, 22–24 Sept. 1999. IEEE, 1999. P. 973–978. doi: 10.1109/ISE.1999.832164
16. Electret State Relaxation of Polymer Fiber Materials / Yu. A. Gorokhovatskiy, D. E. Temnov, O. V. Kuzhelnaja N. A. Chepurayeva // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, 1–5 June 2003. IEEE, 2003. Vol. 3. P. 1240–1243. doi: 10.1109/ICPADM.2003.1218649
17. Рычков Д. А., Кузнецов А. Е., Рычков А. А. Стабилизация заряда полимерных электретов. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2013. 159 с.
18. Dreyfus G., Lewiner I. Evidence of mechanical instabilities of electrets in electric fields // J. of Applied Physics. 1975. Vol. 46, № 10. P. 4357–4360. doi: 10.1063/1.321462
19. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of Physical and Chemical Processes of Anodic Bonding Technology // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. P. 513–518. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513
20. Low temperature wafer anodic bonding / J. Wei, H. Xie, M. L. Nai, C. K. Wong, L. C. Lee // J. of Micromechanics and Microengineering. 2003. Vol. 13, iss. 2. P. 217–222. doi: 10.1088/0960-1317/13/2/308
21. Влияние постоянного электрического поля на процессы осаждения тонких металлических пленок платины методом ионно-плазменного распыления / В. П. Афанасьев, Д. А. Чигирев, Н. С. Пшчелко, Н. П. Сидорова // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 6. С. 59–65.

Информация об авторах

Козодаев Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук (2002), руководитель NT-MDT BV LLC. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнологии; атомно-силовая микроскопия; рамановская микроскопия/спектроскопия.

Адрес: NT-MDT BV LLC, Суттон 11А, Апелдорн, 7327 АВ, Нидерланды

E-mail: kozodaev@ntmdt.nl

<https://orcid.org/0009-0007-1058-5582>

Пшечко Николай Сергеевич – доктор технических наук (2012), доцент (1997), заведующий кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – электрофизические процессы в материалах и структурах.

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

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Посредник Олеся Валерьевна – кандидат физико-математических наук (2006), заместитель заведующего кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – адсорбция на металлах, полупроводниках; карбид кремния; барьер Шоттки; графен; электронные состояния и гетеронаноструктуры.

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

E-mail: ovposrednik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8187-1956>

Булычев Даниил Егорович – магистр по направлению "Нанoeлектроника и фотоника" (2020, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), начальник производства ООО "МЕДЭЛ". Автор семи научных публикаций. Сфера научных интересов – электрофизические процессы в материалах и структурах.

Адрес: ООО "МЕДЭЛ", А/Я 85, пр. Обуховской обороны, д. 86 К, Санкт-Петербург, 192029, Россия

E-mail: daniilbulichev@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-1013-890X>

References

1. Sessler G. M., West J. E. Electret Transducers: A Review. J. of the Acoustical Society of America. 1973, vol. 53, iss. 6, pp. 1589–1600.
doi: 10.1121/1.1913507

2. Kozin S., Fedolov A., Pautkin V., Barinov I. Microelectronic Sensors of Physical Quantities Based on MEMS Technologies. Components and Technologies. 2010, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.)

3. Sessler G. M. Analysis of the Operation of Electret Transducers Subject to Large Electrode Displacements. J. of the Acoustical Society of America. 1974, vol. 55, no. 2, pp. 345–349.
doi: 10.1121/1.1914509

4. Kestelman V. N., Pinchuk L. S., Goldade V. A. Electrets in Engineering: Fundamentals and Applications. New York, Springer, 2000, 281 p.
doi: 10.1007/978-1-4615-4455-5

5. Rychkov A. A., Boytsov V. G. *Elektretnyi effekt v strukturakh polimer-metall* [Electret Effect in Polymer-Metal Structures]. SPb., Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2000, 250 p. (In Russ.)

6. Saveliyev A., Pshchelko N., Krestovnikov K. Method of Sensitivity Calculation for Electrete Diaphragm Capacitive Sensors. 12th Intern. Conf. on Developments in eSystems Engineering, Kazan, Russia, 07–10 Oct. 2019. IEEE, 2019, pp. 486–490.
doi: 10.1109/DeSE.2019.00134

7. Lushcheikin G. A. The Electret Effect in Polymers. Advances in the Preparation and Application of Electrets. Russian Chemical Reviews. 1983, vol. 52, no. 8, pp. 804–815.
doi: 10.1070/RC1983v052n08ABEH002884

8. Gorokhovatsky Yu. A. The Electret Effect and Its Application. Soros Educational J. 1997, no. 8, pp. 92–98. (In Russ.)

9. Pinchuk L. S., Goldade V. A. *Elektretnye materialy v mashinostroenii* [Electret Materials in Mechanical Engineering]. Gomel, Infotribo, 1998, 288 p. (In Russ.)

10. Pshchelko N. S., Sokolova I. M., Zakrzhevskiy V. I. C-V – Testing of Electret Transducers. Proc. of 8th Intern. Symp. on Electrets, Paris, France, 07–09 Sept. 1994. IEEE, 1994, pp. 1028–1033.
doi: 10.1109/ISE.1994.515266

11. Furduev V. V. *Elektroakustika* [Electroacoustics]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat, 1948, 517 p. (In Russ.)

12. Pshchelko N. S., Tairov V. N. Procedure for the Calculation of Electret Receiving Electroacoustic Transducers. Soviet Physics Acoustics. 1988, vol. 34, iss. 4, pp. 406–408.

13. Kuzmin U. I., Pshchelko N. S., Sokolova I. M., Zakrzhevskiy V. I. The Percolation Behavior of Electret at Presence of Water Condensation. Proc. of 8th Intern. Symp. on Electrets, Paris, France, 07–09 Sept. 1994. IEEE, 1994, pp. 124–129.
doi: 10.1109/ISE.1994.514755

14. Busch-Vishniac I. J. Response of an Edge-Supported Circular Membrane Electret Earphone. Part I: Theory. J. of the Acoustical Society of America. 1984, vol. 75, no. 3, pp. 977–989.
doi: 10.1121/1.390564

15. Kozodaev D. A., Pshchelko N. S., Zakrzhevskiy V. I. Analysis of Electret Sub-Miniature Microphones. 10th Intern. Symp. on Electrets, Athens, Greece, 22–24 Sept. 1999. IEEE, 1999, pp. 973–978.
doi: 10.1109/ISE.1999.832164

16. Gorokhovatskiy Yu. A., Temnov D. E., Kuzhelnaja O. V., Chepurayeva N. A. Electret State Relaxation of Polymer Fiber Materials. Proc. the 7th Intern. Conf. on

Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, Japan, 1–5 June 2003. IEEE, 2003, vol. 3, pp. 1240–1243.
doi: 10.1109/ICPADM.2003.1218649

17. Rychkov D. A., Kuznetsov A. E., Rychkov A. A. *Stabilizatsiya zaryada polimernykh elektretov* [Charge Stabilization of Polymer Electrets]. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2013. 159 p. (In Russ.)

18. Dreyfus G., Lewiner I. Evidence of Mechanical Instabilities of Electrets in Electric Fields. J. of Applied Physics. 1975, vol. 46, no. 10, pp. 4357–4360.
doi: 10.1063/1.321462

19. Pshchelko N. S., Sevryugina M. P. Modeling of Physical and Chemical Processes of Anodic Bonding

Technology. Advanced Materials Research. 2014, vol. 1040, pp. 513–518.

doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.513

20. Wei J., Xie H., Nai M. L., Wong C. K., Lee L. C. Low Temperature Wafer Anodic Bonding. J. of Micromechanics and Microengineering. 2003, vol. 13, iss. 2, pp. 217–222.

doi: 10.1088/0960-1317/13/2/308

21. Afanasyev V. P., Chigirev D. A., Pshchelko N. S., Sidorova N. P. Influencing of a DC Electrical Field on a Precipitation Process of Thin Platinum Films by Ionic-Plasma Sputtering Method. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2010, iss. 6, pp. 59–65. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitry A. Kozodaev, PhD (Phys.-Math.) (2002), CEO of NT-MDT BV LLC. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology; atomic force microscopy; Raman microscopy/spectroscopy.

Address: NT MDT BV, Sutton 11A, Apeldoorn, 7327 AB, The Netherlands

E-mail: kozodaev@ntmdt.nl

<https://orcid.org/0009-0007-1058-5582>

Nikolay S. Pshchelko, Dr Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor (1997), Head of the Physics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: electrophysical processes in materials and structures.

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

E-mail: nikolsp@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5545-0461>

Olesya V. Posrednik, Cand. Sci. (2006), Deputy Head of the Department of Physics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: adsorption on metals; semiconductors; silicon carbide; Schottky barrier; grapheme; electronic states and heteronanostructures.

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

E-mail: ovposrednik@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8187-1956>

Daniil E. Bulychiev, Master's degree in Nanoelectronics and Photonics (2020, Saint Petersburg Electrotechnical University). Head of production at MEDEL LLC. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: electrophysical processes in materials and structures.

Address: MEDEL LLC, PO Box 85, Obukhovskoy Oborony Ave., 86, letter K, St Petersburg 192029, Russia

E-mail: daniilbulichev@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0007-1013-890X>

Integrating Radar and Multispectral Data from Sentinel Satellites for Accurate Urban Vegetation Classification using Deep Learning Methods

J. B. Ngoua Ndong Avele

Omar Bongo University, Libreville, Gabon

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ avelejacques@yahoo.fr

Abstract

Introduction. The Sentinel-1 (equipped with synthetic aperture radar) and Sentinel-2 (equipped with multispectral cameras) satellites are valuable tools for environmental monitoring, particularly for assessing vegetation cover and soil erosion. The data obtained by these systems can be processed using machine learning techniques to generate accurate vegetation classification maps.

Aim. To develop and evaluate machine learning models capable of efficiently fusing Sentinel satellite data to produce more accurate and detailed maps of urban vegetation, essential for urban planning, environmental monitoring, and climate change mitigation. The integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite data is intended to overcome the limitations associated with using each data type in isolation, particularly in complex urban environments where spectral signatures can be ambiguous and radar provides only structural information.

Materials and methods. A classification map of urban vegetation on Kotlin Island (St Petersburg) was generated by integrating data from Sentinel-1 (synthetic aperture radar) and Sentinel-2 (multispectral imagery) using the Random Forest algorithm, Tensorflow and Sklearn Python libraries. Conventional urban vegetation mapping often relies on a single data source, leading to limited accuracy and inability to differentiate subtle vegetation types. The vegetation classes considered in this research were coniferous forest, deciduous forest, wetland vegetation, and coastal meadows.

Results. The integrated analysis of radar and multispectral data enabled more accurate identification of erosion-prone zones in non-vegetated areas and more reliable estimation of plant moisture content. Such a fusion approach showed significantly improved classification accuracy and reduced error rate compared to techniques relying on individual indices.

Conclusion. The fusion method demonstrated superior performance in classifying vegetation types, which confirms its potential for applications in remote sensing and environmental monitoring. Future research will focus on integrating radar and multispectral data from Sentinel satellites for urban vegetation classification using the Support Vector Machine algorithm.

Keywords: Sentinel satellites, synthesized aperture radar, multispectral imaging, Random Forest algorithm, machine learning techniques, vegetation classification

For citation: Ngoua Ndong Avele J. B. Integrating Radar and Multispectral Data from Sentinel Satellites for Accurate Urban Vegetation Classification using Deep Learning Methods. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 3, pp. 112–120.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-3-112-120

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

Submitted 22.10.2025; accepted 29.01.2026; published online 29.06.2026

Introduction. Urban vegetation is paramount for maintaining ecological balance in cities, enhancing aesthetic quality, and mitigating such environmental issues as soil erosion and surface water runoff. Densely populated areas, including Kotlin Island in St Petersburg, require robust monitoring of urban green spaces to ensure both plant health and soil stability. The unique geography of the island presents a complex challenge for effective vegetation management. Conventional field surveys are resource-intensive and fail to provide the spatial coverage needed for comprehensive assessment [1].

Accelerating global urbanization is transforming land use patterns and the land cover itself, requiring advanced monitoring and management. This problem requires state-of-the-art technologies for timely and accurate assessment of urban green spaces, which is essential for environmental health and urban planning. The Copernicus program with the Sentinel satellites as its key elements collects comprehensive Earth observation data and, through its user-friendly platform, offers tools for visualization, subsetting, and basic analysis. The Sentinel datasets are useful for applications such as disaster response, precision agriculture, and climate change monitoring, fostering collaborations and knowledge transfer within the scientific community. These satellites provide a substantial amount of information for analysis through combining multispectral imagery from Sentinel-2 with the unique capabilities of synthetic aperture radar (SAR) data from Sentinel-1 [2, 3].

Advanced approaches based on integrating remote sensing techniques are capable of producing comprehensive information on vegetation. Thus, by fusing data from Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 (multispectral imagery) satellites, a highly detailed and accurate representation of vegetation conditions on Kotlin Island can be achieved [4]. In this study, high-resolution radar images and multispectral data from the Sentinel-1 and Sentinel-2 missions are used. The radar data provides insight into the structural characteristics of vegetation, while the multispectral data capture variations in plant health across different spectral bands. The integration of these data elucidates the understanding of plant moisture levels [3]. Another research aspect involves machine learning methods, such as the Random Forest algorithm, to create an accurate vegetation classification map of Kotlin Island [5].

Sentinel-1 radar signals penetrate cloud cover and provide valuable information on soil moisture content, even under adverse weather conditions. This capability is crucial for identifying areas prone to waterlogging, which poses a significant threat to plant health and is a primary driver of soil erosion. Sentinel-2 multispectral imagery provides detailed information on vegetation indices such as the normalized difference vegetation index (NDVI) and chlorophyll content, allowing the overall health and vigor of urban vegetation to be assessed [6]. In other words, Sentinel-2 multispectral imagery captures information across a wide range of wavelengths, enabling a comprehensive analysis of vegetation characteristics. However, cloud cover and atmospheric conditions often impede optical satellite observations. This is where SAR data becomes particularly valuable [7].

Machine learning algorithms have emerged as a leading approach for remote sensing-based classification tasks. In this context, the Random Forest algorithm appears promising due to its ability to handle high-dimensional data, robustness to noise, and capacity to model complex relationships between spectral and radar features. The use of Random Forest supports effective urban planning strategies, thereby promoting the development of more sustainable and eco-friendly urban environments [8].

Materials and methods. Deep learning methods, the Random Forest algorithm, Tensorflow and Sklearn Python libraries were used to generate an urban vegetation classification map. The following vegetation classes were considered: coniferous forest, deciduous forest, wetland vegetation, and coastal meadows. First, independent vegetation classifications using both the NDVI and the radar vegetation index (RVI) were drawn. To enhance classification accuracy, a combination of NDVI, RVI, the modified normalized difference water index (MNDWI), and the soil adjusted vegetation index (SAVI) was applied. Second, the vegetation classes exhibiting the highest temporal prevalence were identified. Finally, density variations among vegetation types were established using the proposed fusion method.

Ecological analysis of Kotlin Island (St Petersburg). Kotlin Island, located in St Petersburg, is characterized by a unique ecosystem and diverse vegetation. NDVI and RVI indices provide a robust framework for assessing the ecological condition of

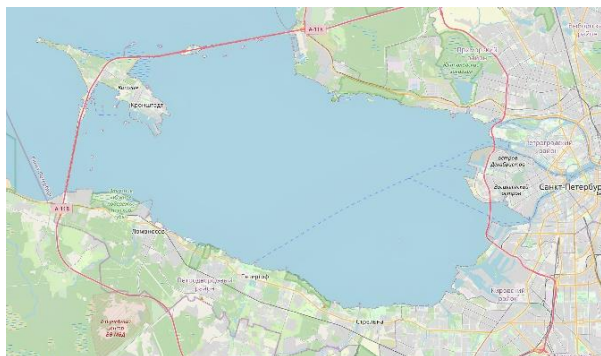


Fig. 1. Location of Kotlin Island (St Petersburg)

the area. These indices derived from remote sensing datasets enable the identification of zones requiring conservation efforts, contribute to erosion prevention, and facilitate monitoring of vegetation health in relation to water availability. The remote sensing datasets integrate Sentinel-1 SAR imagery with Sentinel-2 multispectral data, offering a powerful resource for Earth observation research. These datasets are accessed via the Sentinel Hub platform, developed by the European Space Agency (ESA).

The coastal ecosystem of Kotlin Island is formed by a combination of urban and natural landscapes with extensive green spaces such as parks and gardens that support a wide variety of fauna and flora [9]. Fig. 1 demonstrates the geographical position of Kotlin Island based on the data from OpenStreetMap. For dataset pre-processing, the key vegetation indices of Kotlin Island (St Petersburg), such as NDVI and RVI, should be calculated based on the Sentinel-2 and Sentinel-1 data. NDVI is calculated using near-infrared (NIR) and red spectral bands, representing vegetation reflectance. Conversely, RVI calculation utilizes the ratio of vertical-vertical (VV) and vertical-horizontal (VH) polarizations. The island's soil and vegetation are well adapted to saline conditions typical of coastal environments. Overall, Kotlin Island represents an important ecological zone where urban growth is balanced with environmental preservation.

Indices commonly used for vegetation classification. Sentinel satellite datasets provide a wealth of information for precise mapping or classification of vegetation. In this research, four different indices – NDVI, RVI, MNDWI, and SAVI – were used. The NDVI measures the difference between NIR and red reflectance. The RVI, derived

Tab. 1. Indices used for vegetation classification

Index abbreviation	Formulas
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red})$
RVI	$4\text{VH}/(\text{VV} + \text{VH})$
MNDWI	$(\text{Green} - \text{SWIR})/(\text{Green} + \text{SWIR})$
SAVI	$((\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red} + \text{L}))(1 + \text{L})$
NDMI	$(\text{NIR} - \text{SWIR})/(\text{NIR} + \text{SWIR})$
761	13

from radar backscatter data, is less sensitive to atmospheric conditions and cloud cover. It provides valuable data even in challenging weather conditions. The MNDWI distinguishes water bodies from vegetation, which is essential for accurate vegetation boundary determination. Finally, the SAVI takes into account the influence of soil background on NDVI readings, which is particularly useful in areas with sparse vegetation or bare soil. The formulas used to calculate these indices are given in Tab. 1 [10].

Detailed technical specifications of Sentinel-1 and Sentinel-2 instruments. Sentinel-1 and Sentinel-2 are key components of the Copernicus program developed by ESA. Each mission is designed for specific remote sensing applications. Due to its two-satellite configuration (Sentinel-1A and Sentinel-1B), Sentinel-1 provides a revisit time of approximately six days. Sentinel-2, consisting of two twin satellites (Sentinel-2A and Sentinel-2B), offers a revisit time of five days at the equator. Tab. 2 shows technical specifications of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery. Sentinel-2 uses a push-broom concept combined with a three-mirror anastigmat design with a focal length of approximately 600 mm. The mirrors are made of silicon carbide for optimum thermal stability. The instrument is also equipped with a shutter mechanism for calibration and protection from direct solar illumination. The two satellites are highly complementary. The integration of these datasets significantly improves the accuracy of vegetation mapping and supports environmental monitoring efforts [10].

Training datasets for vegetation classification when using NDVI and RVI in separation. A supervised classification was performed using the Random Forest algorithm. The analysis covered the summer 2024 period, from June to August. Sentinel satellite datasets were accessed through the Sentinel EO Browser online platform that provides access to

Tab. 2. Technical specifications of Sentinel satellites

Item	Sentinel 1A-1B	Sentinel 2A-2B
Orbit altitude and inclination	693 km, 98.2°	788 km, 98.2°
Sensor	Synthesized aperture radar	Multispectral instrument
Resolution	10 × 10 m	10 m – 20 m – 60 m
Revisit period	12 days (using together A and B, 6 days)	5 days at the equator
Beam mode	Interferometric wide swatch (IW)	–
Bands	C (5.4 GHz)	13 spectral bands range from visible and near infrared (NIR) to shortwave infrared (SWIR)
Polarizations	VV-VH	–

Tab. 3. Sentinel-1 and Sentinel-2 images available

Date of acquisition	Sentinel 1A-1B	Sentinel 2A-2B
06.06.2024–04.06.2024	Radiometric terrain corrected	1C
12.06.2024–11.06.2024	Radiometric terrain corrected	2A
24.06.2024–21.06.2024	Radiometric terrain corrected	1C
12.07.2024–09.07.2024	Radiometric terrain corrected	1C
24.07.2024–24.07.2024	Radiometric terrain corrected	1C
30.07.2024–26.07.2024	Radiometric terrain corrected	1C
11.08.2024–08.08.2024	Radiometric terrain corrected	2A

Copernicus Sentinel data [11]. Sentinel-2 products are available in two processing levels: Level-1C (L1C) and Level-2A (L2A). L1C data provide Top-of-Atmosphere (TOA) reflectance values in cartographic geometry, while L2A data provides Bottom-of-Atmosphere (BOA) reflectance after atmospheric correction. Tab. 3 shows the acquisition date and correction level of the selected images.

The first stage of the study involved training the dataset using the NDVI alone. This approach allows assessment of the efficiency of NDVI in classifying vegetation, when used separately from other methods. Overall accuracy (OA) and the Kappa index are essential metrics for a Random Forest classifier. Overall accuracy shows how well the model performs across all data points, without accounting for deeper nuances such as randomness and imbalance. Conversely, the Kappa Index ensures that performance evaluation is fairer or more reliable in complex scenario such as imbalanced datasets or multi-class classification problems. The results of this training process and the key perfor-

Tab.4. Performance metrics table of Random Forest Classification with NDVI

Vegetation classes	Precision value	Recall value	f1-Score value	Support value
Coniferous forest	0.92	0.88	0.90	515 253
Deciduous forest	0.78	0.82	0.80	26 187
Wetland vegetation	0.75	0.70	0.72	57 311
Coastal meadows	0.70	0.80	0.75	106 425

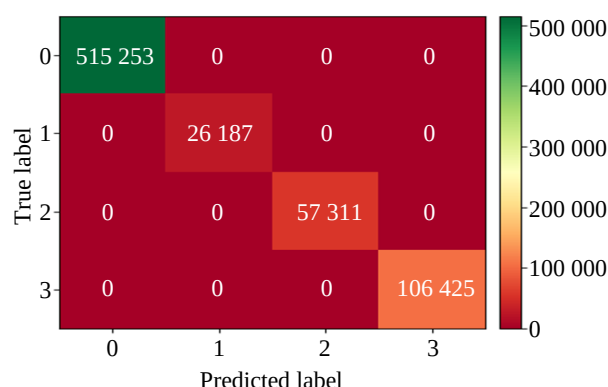


Fig. 2. NDVI confusion matrix evaluation

mance metrics are presented in Tab. 4. The confusion matrix obtained by Random Forest classification is shown in Fig. 2. Values 0, 1, 2, and 3 on the X- and Y-axes correspond to the following vegetation types: 0 for coniferous forest; 1 for deciduous forest; 2 for wetland vegetation and 3 for coastal meadows. In this case, OA is equal to 80 %. It indicates that every instance was classified correctly, i. e., flawless performance in distinguishing different types of vegetation.

The second stage of the study involved training the dataset using the RVI alone, with the purpose of assessing its efficacy in classifying vege-

Tab.5. Performance metrics of Random Forest classification with RVI

Vegetation classes	Precision value	Recall value	f1-Score value	Support value
Coniferous forest	0.70	0.75	0.72	33 203
Deciduous forest	0.75	0.68	0.71	1247
Wetland vegetation	0.80	0.70	0.75	3697
Coastal meadows	0.90	0.95	0.92	70 5353

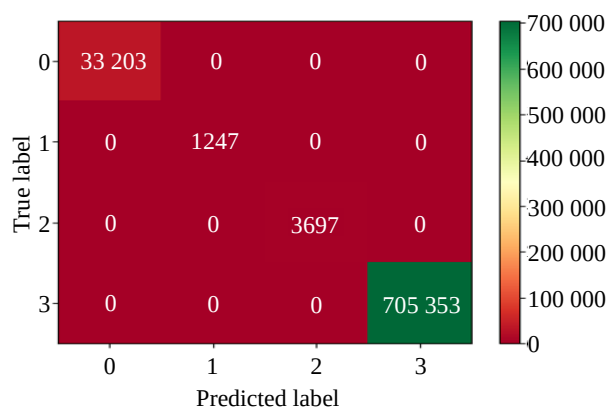


Fig. 3. RVI Confusion matrix evaluation

tation. The outcomes of this procedure are illustrated in Tab. 5 and Fig. 3, where the confusion matrix obtained by Random Forest is presented. In this case, OA is equal to 76 %. The model also correctly predicts the outcome of all the instances. This level of performance is sufficient, considering challenges related to radar sensor limitations and vegetation complexity. The confusion matrices presented in Figs. 2 and 3 and the performance metrics in Tab. 4 and 5 show that coniferous forest is best identified by NDVI. In contrast, radar-based indices are more suited for predicting independently coastal meadows.

Fusion approach using deep learning techniques. The first step of the proposed fusion approach involves the efficiency analysis of the NDVI, MNDWI and SAVI used in combination for classifying different types of vegetation [12, 13]. Tab. 6 and Fig. 4, *a* show the confusion matrix obtained by the Random Forest classifier and the respective performance metrics. The combined use of NDVI, MNDWI and SAVI achieved an overall accuracy of 90 %.

The second step of the proposed fusion method involves the assessment of the combined efficiency of RVI, MNDWI and SAVI in distin-

Tab. 6. Performance metrics table of Random Forest Classification with NDVI_MNDWI_SAVI

Vegetation classes	Precision value	Recall value	f1-Score value	Support value
Coniferous forest	0.85	0.88	0.86	496 664
Deciduous forest	0.75	0.72	0.73	64 830
Wetland vegetation	0.70	0.68	0.69	139 772
Coastal meadows	0.65	0.60	0.62	2835

Tab. 7. Performance metrics obtained by Random Forest classification with RVI, MNDWI, and SAVI

Vegetation classes	Precision value	Recall value	f1-Score value	Support value
Coniferous forest	0.95	0.93	0.94	13 564
Deciduous forest	0.92	0.90	0.91	534 779
Wetland vegetation	0.88	0.87	0.87	142 610
Coastal meadows	0.85	0.80	0.82	14 223

Tab. 8. Performance metrics obtained by Random Forest classification with NDVI, RVI, MNDWI, and SAVI

Vegetation classes	Precision value	Recall value	f1-Score value	Support value
Coniferous forest	0.98	0.97	0.97	268 757
Deciduous forest	0.97	0.95	0.95	67 910
Wetland vegetation	0.94	0.93	0.93	142 218
Coastal meadows	0.92	0.90	0.91	225 216

guishing vegetation types [14, 15]. The results of this procedure are displayed in Tab. 7 and Fig. 4, *b*, showcasing the confusion matrix and metrics parameters generated by Random Forest. The achieved overall accuracy was 87 %.

The final step of the fusion method involves analyzing the efficiency of NDVI, RVI, MNDWI and SAVI when used in combination in differentiating vegetation types. The outcomes of this analysis are presented in Tab. 8 and Fig. 4, *c*, which illustrate the confusion matrix and performance metrics obtained by Random Forest. The achieved overall accuracy was 95 %.

Comparison of density variations among vegetation types using the proposed fusion method. This section of the study focuses on the analysis of density variations across different vegetation types, using the developed fusion method.

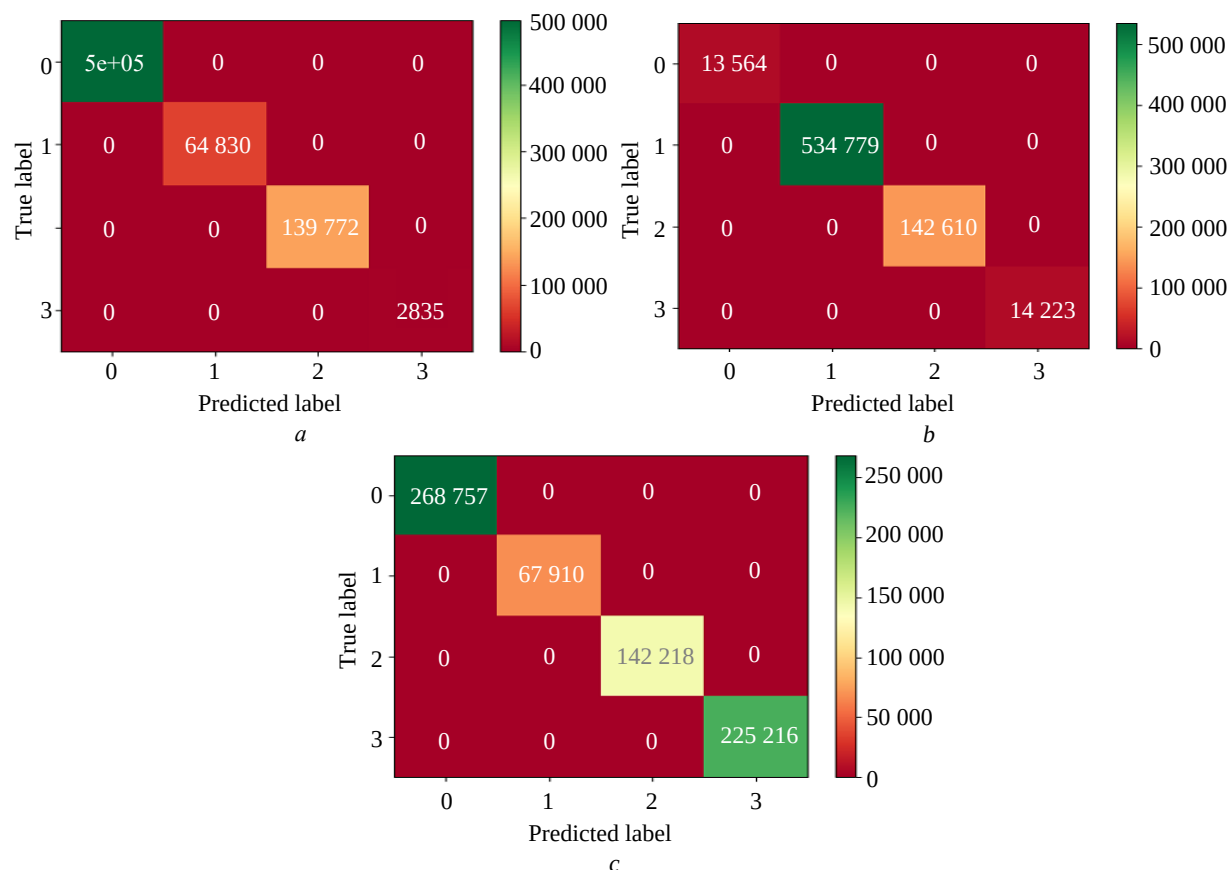


Fig. 4. Fusion confusion matrix evaluation: *a* – NDVI, MNDWI and SAVI; *b* – RVI, MNDWI and SAVI; *c* – NDVI_RVI, MNDWI and SAVI

The initial stage of this analysis involved a detailed examination of the violin plot in Fig. 5, *a* generated from the first iteration of the fusion approach by combining the NDVI, MNDWI and SAVI. It can be seen from Fig. 5, *a* that the combination of NDVI, MNDWI and SAVI yields an excellent level of coniferous forest prediction. Such forests are characterized by a high density of evergreen trees, leading to elevated NDVI values. The use of SAVI can minimize soil effects, allowing for a more accurate detection of coniferous forest cover. The prediction accuracy of deciduous forest is lower, due to seasonal leaf loss. While SAVI still aids in detecting deciduous forest trees, the variability in leaf cover throughout seasons may lead to less consistent predictions. The prediction effectiveness of wetland vegetation is moderate due to the presence of water, which is influenced by MNDWI. The poor prediction of coastal meadows is due to low reflectance values across all indices.

The second stage included a detailed analysis of the violin plot in Fig. 5, *b*, obtained from the second iteration of the fusion approach by integrating RVI, MNDWI and SAVI. The combination of

RVI, MNDWI and SAVI may yield a marginal level of coniferous forest prediction due to its distinct structural characteristics that may not be as pronounced in radar data as those of deciduous forest. For comparison, deciduous forest is predicted with a high level of accuracy, because a combination of SAVI and RVI captures variations in leaf area throughout seasons. Fair prediction of wetland vegetation is achieved by a combination of RVI and SAVI. The diverse plant species found in wetlands may lead to mixed signals in RVI and SAVI, resulting in fair but not perfect predictions. The marginal level of coastal meadow prediction is related to its spectral signature overlap with other land cover types, leading to ambiguity in predictions.

The final stage of this analysis involved a comprehensive examination of the violin plot in Fig. 5, *c*, derived from the third iteration of the fusion approach by combining NDVI, RVI, MNDWI and SAVI. This fusion resulted in perfect predictions of coniferous forest. This type of vegetation exhibits a strong reflectance in the NIR spectrum due to chlorophyll content, thus producing a perfect prediction model. While the fused indices provide

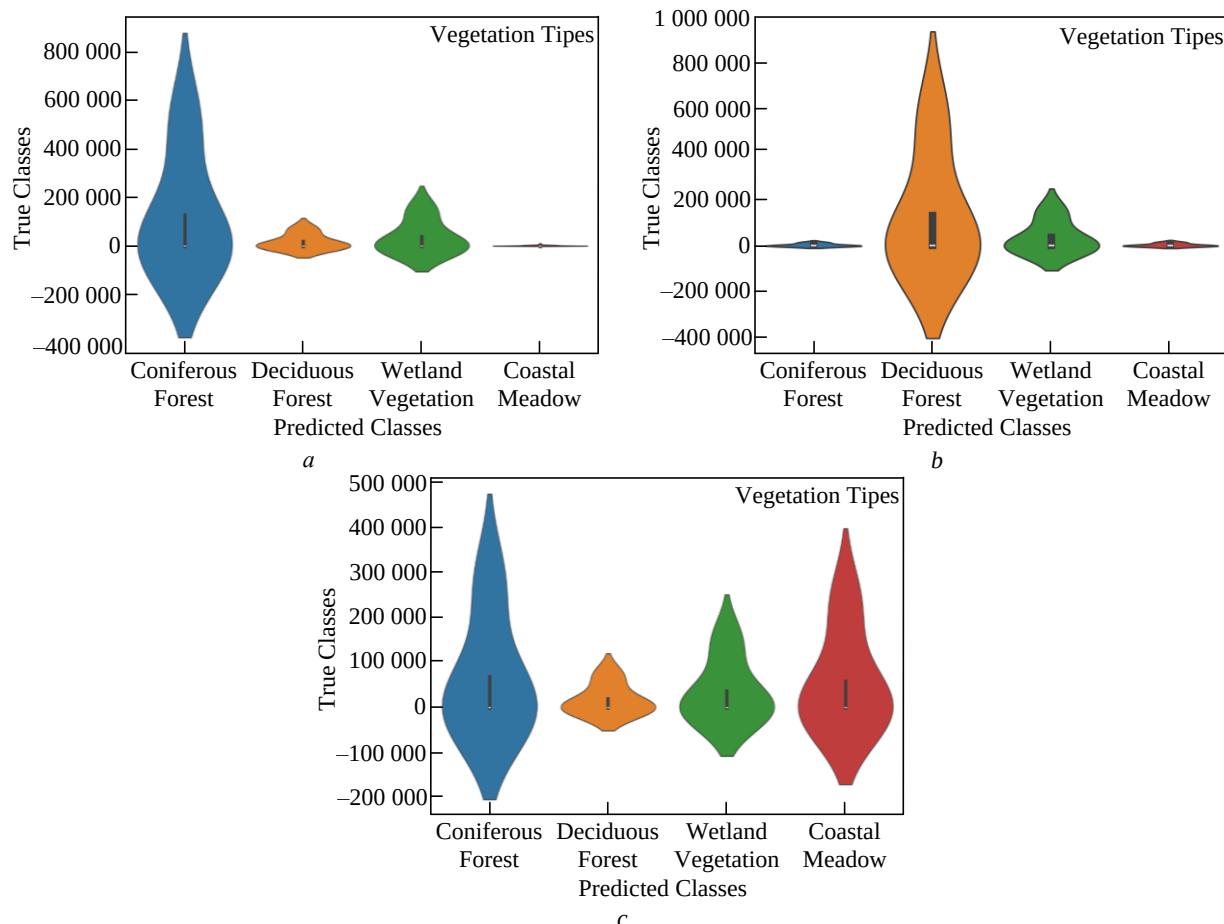


Fig. 5. Vegetation classes distribution: *a* – Vegetation classes distribution (NDVI, MNDWI and SAVI); *b* – Vegetation classes distribution (RVI, MNDWI and SAVI); *c* – Vegetation classes distribution (NDVI, RVI, MNDWI and SAVI)

moderate predictions of deciduous forest due to seasonal variations in the leaf area index, they still capture essential characteristics that allow for reasonable classification accuracy. The integration of MNDWI enhances the capacity of the model to identify wetland area by highlighting water presence alongside vegetation cover. In addition, the model is capable of producing perfect predictions by leveraging the distinct spectral signatures associated with coastal flora and proximity to water bodies.

Results. In this study, the Random Forest algorithm was implemented using two different independent training sets: one for the NDVI and another for the RVI. Additionally, three iterations of the proposed fusion approach were employed, integrating NDVI, RVI, MNDWI and SAVI. The results and comparison of all proposed training models are presented in Tab. 9, 10 and 11. The classification results can be seen in Fig. 6.

Discussion. The conducted research demonstrates the advantages of the proposed fusion method for generating accurate vegetation classification maps using the

Tab. 9. Performance metrics obtained by Random Forest classification with RVI, MNDWI, and SAVI

Model	Overall Accuracy, %	Kappa Index, %
NDVI	76	70
RVI	80	73
NDVI, MNDWI, SAVI	87	80
RVI, MNDWI, SAVI	90	87
NDVI_RVI, MNDWI, SAVI	95	90

Tab. 10. Classification result by class for the Random Forest algorithm

Vegetation types	NDVI	RVI	NDVI MNDWI SAVI	RVI MNDWI SAVI	NDVI_RVI MNDWI SAVI
Coniferous forest	Present	Present	Present	Present	Present
Deciduous forest	Present	Present	Present	Present	Present
Wetland vegetation	Present	Present	Present	Present	Present
Coastal meadows	Present	Present	Present	Present	Present

Random Forest algorithm. Vegetation classification is an essential task in ecological research, land cover

Tab. 11. Class-wise agreement level for the Random Forest classification

Vegetation types	NDVI	RVI	NDVI MNDWI SAVI	RVI MNDWI SAVI	NDVI_RVI MNDWI SAVI
Coniferous forest	Perfect	Very slight	Perfect	Slight	Perfect
Deciduous forest	Very slight	Poor	Fair	Perfect	Moderate
Wetland vegetation	Slight	Poor	Moderate	Fair	Almost perfect
Coastal meadows	Fair	Perfect	Poor	Slight	Perfect

mapping, and agricultural management. Individual spectral indices, such as NDVI, RVI, MNDWI and SAVI, are widely used. However, these indices have limitations in distinguishing spectrally similar vegetation types or in areas with a complex canopy structure. The fusion approach that integrates multiple indices or different types of remote sensing data provides a richer feature space for training the Random Forest algorithm.

This study employed the Random Forest algorithm, a powerful ensemble learning method well suited for handling high-dimensional data and less prone to overfitting than other classification algorithms. Class-wise agreement for the Random Forest classification is given in Tab. 11. By using the diverse feature set obtained through data fusion, subtle differences between vegetation classes can be captured more effectively. Increased classification accuracy and reduced error rates are direct benefits of the proposed fusion approach. The improved accuracy of the resulting vegetation map (Fig. 6) has significant implications for biodiversity conservation, agricultural yield prediction, deforestation monitoring, etc.

Conclusion. The present study has achieved improved classification of urban vegetation on Kotlin Island (St Petersburg), thus demonstrating the substantial benefits of integrating multiple data

sources for environmental analysis. The findings underscore two principal outcomes.

First, the data fusion approach enables a more precise identification of erosion-prone zones in non-vegetated areas and facilitates estimation of plant moisture content. This result is consistent with basic principles in landscape ecology and remote sensing, where multispectral and multi-source data fusion is essential for capturing complex ecological patterns and processes.

Second, the results clearly demonstrate the superiority of the fusion approach over individual index-based methods. The fusion methodology yields a significantly higher classification accuracy and reduced error rates across all studied vegetation types. This finding is consistent with established research in environmental monitoring and geospatial sciences, which highlights that data integration techniques enhance both the thematic resolution and reliability of land cover classification.

Moreover, these advancements have practical implications for ecosystem management. Accurate mapping of erosion-prone areas supports targeted conservation efforts and sustainable land use planning, which are critical priorities emphasized in contemporary forest ecology literature.

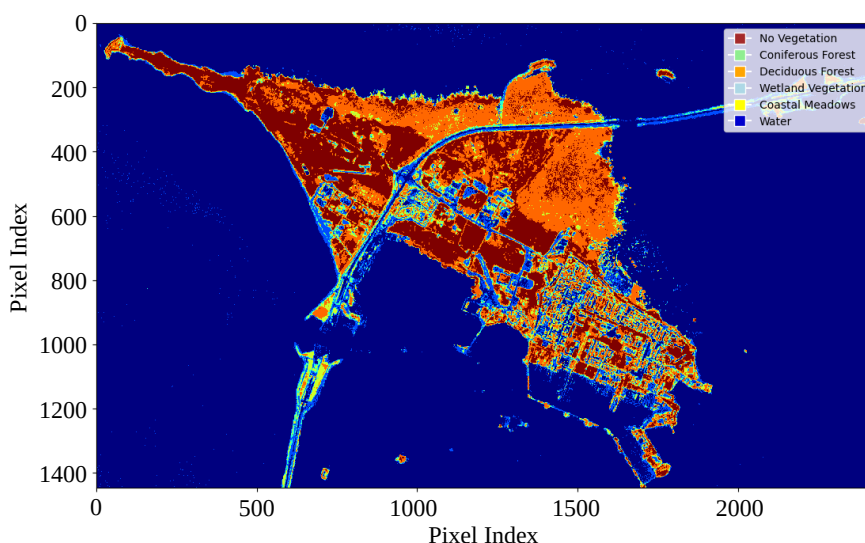


Fig. 6. Resulting vegetation classification map

In summary, this study confirms that integrated data analysis not only refines our understanding of diverse plant environments but also provides actiona-

ble information for ecological management. The proven effectiveness of this fusion approach supports its wider adoption in future environmental assessments.

References

1. Mohammadpour P., Viergas D. X., Viergas C. Vegetation Mapping with Random Forest Using Sentinel 2 and GLCM Texture Feature—A Case Study for Lousa Region, Portugal. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, iss. 18, art. no. 4585. doi: 10.3390/rs14184585
2. Niculescu S., Billey A., Ou Ali H. T. Random Forest Classification using Sentinel-1 and Sentinel-2 series for vegetation monitoring in the Pays de Brest (France). *Proc. of SPIE Remote Sensing*, Berlin, Germany, 9 Oct. 2018. Vol. 10783. doi: 10.1117/12.2325546
3. Kovarnik R., Janova J. Validation of Sentinel 2 Based Machine Learning Models for Czech National Forest Inventory. *Ecological Informatics*. 2025, vol. 87, art. no. 103133. doi: 10.1016/j.ecoinf.2025.103133
4. Zhang X., Shen H., Huang T., Wu Y., Guo B., Liu Zh., Luo H., Tang J., Zhou H., Wang L., Xu W., Ou G. Improved Random Forest Algorithms for Increasing the Accuracy of Forest Aboveground Biomass Estimation Using Sentinel-2 Imagery. *Ecological Indicators*. 2024, vol. 159, art. no. 111752. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.111752
5. Wang T. Improved Random Forest Classification Model Combined with C5.0 Algorithm for Vegetation Feature Analysis in Non-Agricultural Environments. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, art. no. 10367. doi: 10.1038/s41598-024-60066-x
6. Majikumna K. U., Zineddine M., Mustapha M., Ahmed E. H. A. Random Forest and Sentinel-2 Based Approach for Evaluating Climate Change on Olive Trees. 4th Intern. Conf. on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, Fes, Morocco, 16–17 May 2024. *IEEE*, 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10548349
7. Rynkiewicz A., Hoscito A., Aune-Lundberg L., Nilssen A. B., Lewandowska A. Detection and Quantification of Vegetation Losses with Sentinel-2 Images Using Bi-Temporal Analysis of Spectral Indices and Transferable Random Forest Model. *Remote Sensing*. 2025, vol. 17, iss. 6, art. no. 979. doi: 10.3390/rs1706097
8. Kallel A., Mura M. D., Fakhfakh S., Romdhane N. B. Physics-Based Fusion of Sentinel-2 and Sentinel-3 for Higher Resolution Vegetation Monitoring. *IEEE Transac-*
- tions on Geosciences and Remote Sensing. 2023, vol. 61, art. no. 5403317. doi: 10.1109/TGRS.2023.3257219
9. Roßberg T., Schmitt M. Dense NDVI Time Series by Fusion of Optical and SAR-Derived Data. *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2024, vol. 17, pp. 7748–7758. doi: 10.1109/JSTARS.2024.3379838
10. Liang Y., Li Y., Li J., Li Y., Li F., Zhang Sh. Fusion of Optical and SAR Images Via NDVI-Like Images to Reconstruct NDVI Time Series in Cloud-Prone Regions. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp., Athens, Greece, 07–12 July 2024. IEEE*, 2024, pp. 9307–9310. doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10641085
11. Vuolo F., Žóltak M., Pipitone C., Zappa L., Wenng H., Immitzer M., Weiss M., Baret F., Atzberger C. Data Service Platform for Sentinel-2 Surface Reflectance and Value-Added Products: System Use and Examples. *Remote Sensing*. 2016, vol. 8, iss. 11, art. no. 938. doi: 10.3390/rs8110938
12. Gašparović M., Medak D., Pilaš I., Jurjević L., Balenović I. Fusion of Sentinel-2 and Planetscope Imagery for Vegetation Detection and Monitoring. *The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018, vol. XLII-1, pp. 155–160. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-155-2018
13. Cardona-Mesa A. A., Vasquez-Salazar R. D., Gomez L., Travieso-González C. M., Garavito-González A. F., Vásquez-Cano E., Díaz-Paz J. P. Dataset of Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 RGB-NDVI Imagery. 2024, vol. 57, art. no. 111160. doi: 10.1016/j.dib.2024.111160
14. El Moussaoui E. H., Moumni A., Lahrouni A. Assessing the Influence of Different Synthetic Aperture Radar Parameters and Digital Elevation Model Layers Combined with Optical Data on the Identification of Argan Forest in Essaouira Region, Morocco. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2024, vol. 17, iss. 2, pp. 100–108. doi: 10.3832/ifer4183-016
15. Jia P., Mohd Shafri H. Z., Yu S., Zheng Z., You Sh., Shariff A. R. M. Radar-Optical Fusion of Sentinel-1/2 for High-Resolution NDVI Reconstruction and Landscape-Driven Carbon Flux Assessment in Kuala Selangor, Malaysia (2020–2024). *Intern. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025, vol. 145, art. no. 104966. doi: 10.1016/j.jag.2025.104966

Information about the authors

Jacques B. Ngoua Ndong Avele, Bachelor in Omar Bongo University, Libreville, Gabon, Master's degree in Quantum and Optical Electronics (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University). Postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems in Radio Navigation and Radar of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: Earth remote sensing; lidars; radars; unmanned aerial vehicles; spacecraft; machine learning.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: avelejacques@yahoo.fr
<https://orcid.org/0009-0004-6564-0743>

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 (Source of funding);
 - 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 навигация.

"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, 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 29 № 3 2026

Vol. 29 No. 3 2026

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 23.06.26. Дата выхода в свет 29.06.26.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 16.38. Печ. л. 15.75. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 90.
Цена свободная.

Signed to print 23.06.26. Publication date 29.06.26.
Sheet size 60×84 1/8. Educational-ed. liter. 16.38. Printed sheets 15.75.
Number of copies 300. Printing plant 1–150 copies. Order no. 90.
Free price.

Отпечатано в издательстве СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

Published by ETU Publishing house
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia