



DOI: 10.32603/1993-8985

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

Известия высших учебных заведений России

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Том 27 № 4 2024



Journal of the Russian Universities

RADIOELECTRONICS

Vol. 27 No. 4 2024

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

2024

Saint Petersburg
ETU Publishing house

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

Индекс по каталогу АО «Почта России» П4296

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

Издается 6 раз в год.

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

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

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

Редакция журнала:

197022, Санкт-Петербург,

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

Тел.: 8 (812) 234-10-13,

e-mail: radioelectronic@yandex.ru

RE.ELTECH.RU

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», оформление, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А. В. СОЛОМОНОВ, д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В. М. КУТУЗОВ, д.т.н., президент, 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

Alexei KANAREYKIN, Dr Sci., гл. исполн. директор, Euclid TechLabs LLC, Солон, США

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

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

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. М. УСТИНОВ, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН, директор, Центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, 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.), President, 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

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

Alexei KANAREYKIN, Dr Sci. (Phys.-Math.), President/CEO of Euclid TechLabs LLC, Solom, USA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Victor M. USTINOV, Dr Sci. (Phys.-Math.), Correspondent Member of RAS, director, Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, St Petersburg, Russia

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

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

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

EXECUTIVE SECRETARY

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

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

Key Objectives:

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

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



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

СОДЕРЖАНИЕ

Обзорные статьи

Радиолокация и радионавигация

Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань, Нгуен Чонг Иен. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении.....6

Научные статьи

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

Комнатнов М. Е. Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер.....19

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

Дмитриев Д. Д., Гладышев А. Б., Грицан О. Б. Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот.....38

Микро- и нанoeлектроника

Мироненко И. Г., Соколов С. С., Иванов А. А. Решение собственной задачи прямоугольных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением методом Фурье.....52

Барабан А. П., Дмитриев В. А., Дрозд А. В., Мошников В. А.
Синтез молекулярным наслаиванием и исследование наноструктурированных оксидных слоев в высокоаспектных подложках.....61

Радиофотоника

Богословская Л. С., Дудин А. Л., Зубков В. И. Исследование влияния ширины барьера на рабочее напряжение QWIP.....72

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

Сорвина М. А., Кукаев А. С. Способы подключения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с концентрической формой электродов.....81

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

Дроздова А. В., Ткаченко А. Н., Скребова Е. М., Сакун И. А. Алгоритм обработки измерений параметров внешнего дыхания с использованием системы захвата движений.....91

Чувашов Р. Д. Метод подбора комбинаций оптических хемосенсорных материалов для идентификации парофазных экотоксикантов.....103

От редакции

Правила для авторов статей.....117

CONTENTS

Review articles

Radar and Navigation

- Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen.** Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles.....6

Original articles

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

- Komnatnov M. E.** Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell.....19

Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

- Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Gritsan O. B.** Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station.....38

Micro- and Nanoelectronics

- Mironenko I. G., Sokolov S. S., Ivanov A. A.** Solution to the Eigenvalue Problem of Rectangular Waveguides with Partial Dielectric Filling by Fourier Transform.....52

- Baraban A. P., Dmitriev V. A., Drozd A. V., Moshnikov V. A.** Molecular Layering Synthesis and Investigation of Nanostructured Oxide Layers in High Aspect Ratio Substrates.....61

Microwave Photonics

- Bogoslovskaya L. S., Dudin A. L., Zubkov V. I.** Influence of Barrier Width on QWIP Operating Voltage.72

Measuring Systems and Instruments Based on Acoustic, Optical and Radio Waves

- Sorvina M. A., Kukaev A. S.** Methods for Connecting a Concentrically Shaped Sensing Element of Microaccelerometers on Surface Acoustic Waves.....81

Medical Devices, Environment, Substances, Material and Product

- Drozdova A. V., Tkachenko A. N., Skrebova E. M., Sakun I. A.** Algorithm for Processing Measurements of External Respiration Parameters Using Motion Capture Systems.....91

- Chuvashov R. D.** Method for Selecting Combinations of Optical Chemosensory Materials for Identification of Vapor-Phase Ecotoxics.....103

From the Editor

- Author's Guide**.....117

Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении

А. М. Боронахин¹, Нгуен Куок Хань^{2✉}, Нгуен Чонг Иен³

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

²Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

³Академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Аннотация

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются активно развивающейся сферой в последние годы. Во всех областях применения БПЛА особое значение уделяется точности позиционирования. Спутниковая система навигации (GPS) является оптимальным методом позиционирования для наружной среды, однако для внутренней среды ослабление сигнала GPS становится серьезным препятствием при определении местоположения БПЛА. Проведено множество исследований, посвященных разработке различных технологий позиционирования в помещении, отвечающих критериям компактности и малой массы, подходящих для малогабаритных летательных аппаратов, включая оптический поток, инерциальную навигационную систему, ультразвук и т. д. В настоящее время имеется немного обзоров технологий позиционирования в помещениях для автономных БПЛА, основанных на поиске информации по соответствующим статьям и на сравнении датчиков. Недостатками этих обзоров является неполнота оценки по основным критериям и неконкретность рассмотрения принципов их работы. С этой целью в данной статье представлен обзор современных технологий позиционирования в помещении, их принципов работы и оценка по разным критериям: точности, рабочему диапазону, стоимости. Дается оценка перспективной технологии на основе машинного зрения.

Цель работы. Классификация современных технологий навигации в помещении для БПЛА, а также оценка рассматриваемых технологий по разным критериям.

Материалы и методы. Классификация методов внутреннего позиционирования БПЛА по типу сигнала, используемого для подключения, и способности обработки информации без внешних сигналов. Оценка методов по критериям: точность, рабочий диапазон, стоимость, а также по их преимуществам и недостаткам.

Результаты. Представлена таблица классификации и оценки технологий навигации БПЛА в помещении, проведено обзорное представление этой области.

Заключение. Проведен обзор систем навигации БПЛА во внутренней среде. Рассмотрена технология на основе машинного зрения как перспективная и многообещающая в данной области.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат (БПЛА), позиционирование в помещении, оценка характеристик, технологии, основанные на техническом зрении

Для цитирования: Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань, Нгуен Чонг Иен. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; принята к публикации после рецензирования 17.05.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles

Alexander M. Boronakhin¹, Nguyen Quoc Khanh^{2✉}, Nguyen Trong Yen³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

³ Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Abstract

Introduction. In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have been a rapidly advancing field. In all areas of UAV application, positioning accuracy is of particular importance. For outdoor environments, satellite navigation systems (such as GPS) are always the method of choice. However, for indoor environments, GPS signal weakening becomes a serious obstacle for determining the UAV location. A number of studies have been carried out to develop various indoor positioning technologies that meet the criteria of compactness and light weight, thus suitable for small aircrafts, including optical flows, inertial measurement systems, ultrasound, etc. However, there is a lack of comparative studies reviewing indoor positioning technologies for autonomous UAVs. The existing reviews fail to provide a comprehensive assessment of such technologies and their operational principles according to the main criteria. In this connection, this paper aims to review modern indoor positioning technologies and their operational principles, conducting evaluation according to such criteria as accuracy, operating range, cost. The assessment of promising machine vision-based technologies is carried out.

Aim. To classify modern indoor navigation technologies for UAVs; to assess the technologies under consideration according to various criteria.

Materials and methods. The current technologies for UAV indoor positioning were classified by the signal type used for connection and their capability to process information without external signals. The technologies were assessed according to the following criteria: accuracy, operating range, cost, as well as their advantages and disadvantages.

Results. A classification and evaluation table of UAV indoor positioning technologies is proposed; a review of the current developments in the field is given.

Conclusion. A review of UAV indoor positioning technologies has been carried out. In addition, the prospects of machine vision-based technologies are outlined.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), indoor positioning, performance assessment, vision-based technologies

For citation: Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen. Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 6–18. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

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

Submitted 15.04.2024; accepted 17.05.2024; published online 27.09.2024

Введение. С ростом технологий беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали чрезвычайно развивающейся сферой в последние годы. Отличительной чертой БПЛА является способность выполнения задачи как в наружной среде, так и в помещениях, а также способность перемещения в сложных и опасных для людей зонах [1, 2]. Применение БПЛА включает разведку, наблюдение, сельскохозяйственные работы и т. д. Во всех случаях точность определения местоположения всегда является важным вопросом. Для наружной среды

оптимальным решением для навигации является GPS (Global Positioning System). Однако для внутренней среды возникают многочисленные проблемы, если сигнал системы GPS ослабевает и становится нестабильным. Характерными чертами внутренней среды являются ограниченное пространство и высокая плотность препятствий, что влияет на размеры, массу и уровень автоматизации малогабаритных летательных аппаратов (МЛА). В настоящее время ученые разработали множество технологий для контроля и управления движением МЛА с ис-

пользованием небольших и легких датчиков. К ним относятся оптический поток, инерциальная навигационная система (ИНС), ультразвук и т. д. Однако каждая из этих технологий имеет свои недостатки: невысокая точность и большие объемы вычислений для системы оптического потока [3]; накопление погрешности с течением времени для ИНС; ультразвук же обеспечивает высокую точность, но имеет малый радиус действия [3]. Таким образом, перспективным направлением развития станет комбинирование методов для устранения недостатков каждой технологии.

В настоящее время существует немного обзоров технологий позиционирования в помещениях для автономных БПЛА. В [4] представлен обзор технологий позиционирования на основе поиска информации по соответствующим статьям в системе IEEE Xplore. Однако в этом исследовании не описаны подробно принципы работы каждого метода и их классификация. Кроме того, в нем не содержится достаточной информации о современных методах. В [3] представлено сравнение датчиков, используемых для позиционирования в помещении. Несмотря на то что была предложена классификация датчиков, оценка неполная, дана без учета точности и радиуса действия. Сравнительный отчет по технологиям позиционирования в помещениях представлен в [5], где особое внимание уделяется таким распространенным системам, как оптический поток, ультразвук, LIDAR и Vicon, но не предложена полная классификация, позволяющая получить представление о современных технологиях позиционирования. С этой целью в статье представлена подробная классификация технологий по различным критериям, а также оценка и анализ конкретных методов с целью предоставления более целостного обзора этой области. Кроме того, рассматривается технология на основе технического зрения – новое и многообещающее решение для применения позиционирования в помещениях. Особое внимание уделяется двум системам: "lighthouse" и захвату движения. Это новые пути, открывающие большие перспективы для развития БПЛА.

Классификация. Технологии позиционирования внутренней среды часто классифицируются по типу сигнала, используемого для

подключения и способности обработки информации без внешних сигналов. Обычно разделяют два типа: автоматические и полуавтоматические. На рис. 1 показана классификация технологии по этим критериям.

1. Оптический поток. Метод определения видимого движения пикселей плоскости изображения с одинаковой интенсивностью между двумя последовательными кадрами [2] позволяет определять положение, скорость и направление объекта. Точность системы зависит от характеристик датчика и рассматриваемого алгоритма. Алгоритм определения оптического потока основан на следующих свойствах [6, 7]: постоянная яркость, плавность изображения и незначительное смещение пикселей. Некоторые алгоритмы, используемые для БПЛА:

- метод Лукаса–Канаде [8]
- метод вычисления оптического потока Хорна–Шунка, минимизирующий локальные погрешности [9];
- метод Сринивасана для малогабаритных БПЛА [10];
- метод суммарной абсолютной разницы (SAD) в сочетании с ИНС [11];
- метод масштабно-инвариантного преобразования признаков (SIFT), представляющий оптический поток на основе корреляции характеристик с движениями пикселей [12, 13].

Техника оптического потока часто используется для решения таких задач, как посадка, распознавание пространства, обнаружение препятствий и регулировка скорости полета [5]. Преимуществом метода является использование подходящего для размеров МЛА компактного и легкого датчика, имеющего высокую автоматичность и не требующего вмешательства внешних систем. Тем не менее существуют и определенные недостатки: невозможность составления карт пространства в формате 3D; большое количество вычислений, которые требуют мощных вычислительных платформ. В [14] была предложена система позиционирования для БПЛА в помещении с использованием метода Лукаса–Канаде. Система применяет ошибку "вперед-назад", что повышает точность в процессе сопоставления признаков. В конечном итоге оценки движения зависят от подхода к плоскости отверстия камеры-обскуры. Новая

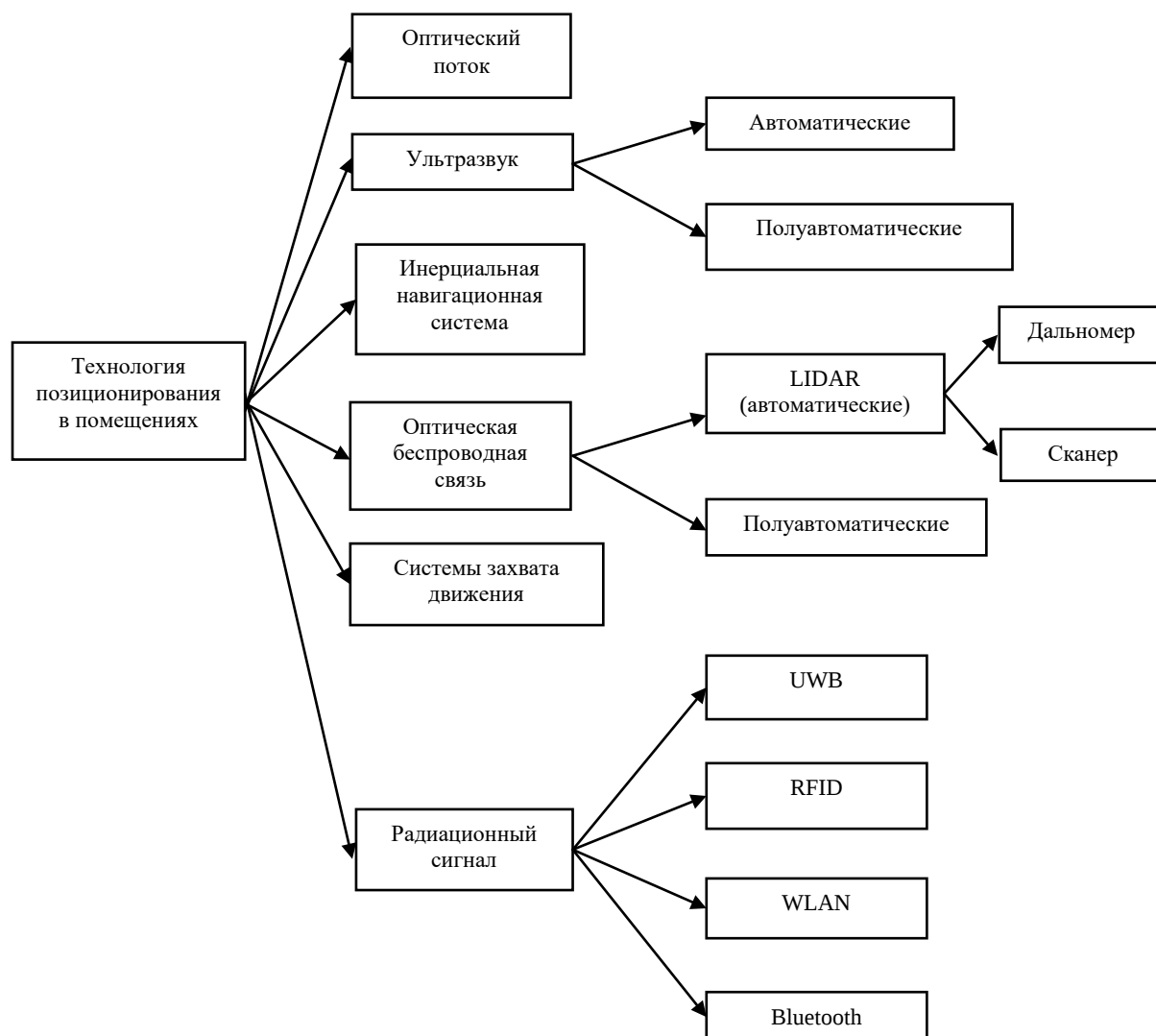


Рис. 1. Классификация технологий позиционирования БПЛА в помещениях

Fig. 1. Classification of indoor positioning technologies for UAV

система объединяет разреженные и плотные оптические потоки с расширенным фильтром Калмана для позиционирования БПЛА в помещении [15]. Отличительной особенностью здесь является использование измерений плотного оптического потока для оценки скорости БПЛА.

2. Ультразвук. Ультразвуковая система позиционирования в помещении использует высокочастотный звук как передаваемую волну для определения расстояния от приемника до передатчика. Ультразвуковая система позиционирования бывает как автоматической, так и полуавтоматической. Автоматическая система использует тот же принцип, что и летучая мышь: приемник и передатчик расположены на борту и передатчик испускает ультразвуковые волны в окружающую среду [5]. При столкно-

вении с препятствиями они отражаются, и система вычисляет расстояние от БПЛА до объекта на основе времени от момента испускания волны до момента ее приема. Автоматизированная ультразвуковая система используется для обнаружения объектов, поддержания дистанции и удержания высоты. Полуавтоматическая система использует фиксированные опорные точки [15]. Затем рассчитывается время пролета (Time of Flight – ToF) и триангуляции для определения абсолютного положения относительно некоторой фиксированной системы координат. Благодаря небольшой массе (несколько граммов), низкому энергопотреблению и доступной стоимости при высокой точности в несколько сантиметров ультразвуковые датчики исключительно полезны для применения

на БПЛА, особенно в помещениях, где требуется оборудование с ограниченной грузоподъемностью. Однако основным недостатком этой системы является небольшой радиус действия (несколько метров) и сильное влияние условий окружающей среды из-за поглощения звука (температура, влажность воздуха, давление) [3]. В [16] предложена система, сочетающая ультразвук и оптику для позиционирования БПЛА. Ультразвуковой модуль использует схему множественного доступа с временным разделением кодов для вычисления горизонтального положения БПЛА с помощью процедуры мультилатерации 2D. В [17] для оценки 3D-местоположения БПЛА используется система в помещении с 5 размещенными на потолке опорными точками, излучающими ультразвуковые волны.

3. Радиотехнический сигнал. Радиотехнические системы широко используются для определения абсолютного положения БПЛА во внутренней среде. Общие методы для радиотехнических систем включают индикацию измеренного уровня сигнала, измерение времени прибытия или триангуляцию. Основными технологиями, используемыми для позиционирования БПЛА в помещениях, являются WLAN, RFID, UWB и Bluetooth.

3.1. Сверхширокополосный диапазон (UWB) является одной из наиболее широко используемых технологий для позиционирования в помещениях. Система основана на широкой полосе пропускания (несколько сотен мегагерц) в диапазоне коротких временных импульсов (1 нс) для обеспечения точности в пределах нескольких сантиметров [3]. Самым большим преимуществом использования UWB является его высокая устойчивость к многолучевому распространению. Это можно объяснить использованием широкой полосы пропускания, что облегчает обнаружение запаздывающих сигналов. Технология UWB работает на малой длине волны, в которой часть сигнала способна проникать сквозь такие материалы, как стекло, бетон и дерево, что обеспечивает возможность позиционирования в помещении в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), когда часто присутствуют препятствия [16–18]. С другой стороны, часть сигнала поглощается объектами, что сильно затрудняет определение местоположения на

больших расстояниях. Таким образом, извлечение информации из сигнала является большой проблемой для этой технологии. UWB использует методы измерения времени прибытия (Time of Arrival – ToA) и разницы во времени прибытия (Time Difference of Arrival – TDoA) для определения местоположения БПЛА в помещении [18]. В [19] представлен подход к позиционированию БПЛА во внутренней среде с использованием UWB, основанный на TDoA. Система использует 8 приемных узлов, закрепленных на стенах, и метку, расположенную на БПЛА. В [20] представлен новый подход к построению 3D-карты, сочетающий UWB и облака точек. Карта используется в методе локализации Монте-Карло для оценки положения БПЛА.

3.2. Идентификация радиочастоты (RFID) – это технология, использующая радиоволны для идентификации и отслеживания меток. БПЛА, использующий систему RFID, оснащен считывающим устройством с распознающей антенной, собирающим информацию о местоположении закрепленных меток, на основании чего вычисляется относительное местоположение устройства [18]. Метки RFID делятся на два типа: пассивные и активные. Пассивные метки работают по принципу индукции без использования батареи, в отличие от активных меток. Основными методами, используемыми в системах RFID, являются ячейка происхождения (Cell of Origin – CoO), ToA и индикатор уровня полученного сигнала (Received Signal Strength Indicator – RSSI). Из них наиболее распространенным является CoO из-за простоты вычислений [21]. Точность системы во многом зависит от плотности меток, а также от радиуса действия и обычно составляет от 1 до 5 м [5]. Поскольку такой точности недостаточно для применения позиционирования в помещении, в настоящее время точность системы RFID улучшается комбинированием нескольких систем позиционирования. В [22] спроектирован автономный БПЛА для задачи инвентаризации склада. БПЛА оснащен системой позиционирования, включающей алгоритм обхода препятствий и алгоритм планирования и навигации на основе стигмергии.

3.3. WLAN (беспроводная локальная сеть, стандарт IEEE 802.11) может использоваться

для определения местоположения мобильных устройств в помещении. Наиболее очевидными преимуществами системы WLAN являются ее широкая доступность во многих помещениях и возможность использования стандартных мобильных устройств [18]. Зона покрытия WLAN значительная – от 50 до 100 м. Кроме того, сигнал Wi-Fi способен проникать сквозь объекты, поэтому требования к прямой видимости отсутствуют [23]. Распространенным методом, используемым для WLAN, является "отпечаток пальца" (fingerprint) на основе RSSI, но это неточный метод для определения местоположения БПЛА в помещении (точность от 2 м), поэтому его обычно комбинируют с другими технологиями для повышения эффективности. Точность системы WLAN обычно зависит от сложности структуры системы. В [24] предложен метод многомерного шкалирования и взвешенной локализации центра для определения расстояния от БПЛА до существующей инфраструктуры Wi-Fi.

3.4. Bluetooth – это стандарт беспроводной связи для беспроводных персональных сетей, созданный Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth является довольно разумным выбором для определения местоположения БПЛА в помещении из-за его низкой стоимости и низкого энергопотребления. Однако точность системы не гарантируется (в пределах 2 м). Радиус действия Bluetooth довольно мал – от 5 до 10 м [18]. Используемыми методами являются RSSI и ToA. В настоящее время исследования Bluetooth продолжаются из-за его компактности и простоты способа связи. В [25] представлена система патрулирования БПЛА на основе системы Bluetooth.

4. Системы захвата движения – современные системы, которые позволяют воссоздать движение отслеживаемого объекта, обычно используются в виртуальной реальности, а также в создании анимации. Навигация во внутренней среде также является интересной областью применения для этих систем [3]. Система состоит из нескольких камер с отдельными зонами покрытия [5]. Камеры используют инфракрасные светодиоды для создания изображений, которые после фильтрации становятся черными за исключением прикрепленных к БПЛА шаров, отражающих инфракрасный свет. Наземный

центральный компьютер подключается к камерам через специальную сеть, собирает и обрабатывает данные, восстанавливает движение БПЛА в реальном времени. Точность системы захвата движения может достигать нескольких миллиметров, что является идеальной точностью для внутреннего позиционирования. Однако стоимость развертывания системы довольно высока (до 30 тыс. долларов США) и подходит только для специализированных лабораторий. В [26] представлен алгоритм управления БПЛА на основе визуального сервоуправления с использованием системы Vicon.

5. ИНС – это распространенная в навигации система, используемая для оценки положения, скорости, а также направления. Основными компонентами ИНС являются: 3 акселерометра для измерения линейного ускорения, 3 гироскопа для измерения угловой скорости и/или магнитометра для измерения силы и направления магнитного поля. Точность положения во многом зависит от качества первоначального положения и ориентации [18]. Преимуществами ИНС являются автономность, высокая частота обновления, высокая стабильность, что подходит для кратковременного позиционирования. Основным недостатком этой системы является накопление ошибок с течением времени, поскольку система использует метод интегрирования для определения положения и ориентации [27]. Для преодоления этого недостатка в настоящее время ИНС обычно сочетаются с низкочастотными системами для обновления позиционирования, чтобы устранить накопленные ошибки. В [27] ИНС объединяется с одной камерой на борту для построения трехмерной карты и локализации БПЛА в помещении.

6. Оптическая беспроводная связь (OWC) – перспективная технология для локализации и 3D-картирования, которая обеспечивает высокую пропускную способность, гибкость, масштабируемость, простоту использования, высокую безопасность и скорость и может заменить радиотехнические во многих применениях в будущем [28]. Для позиционирования БПЛА во внутренней среде можно разделить на два типа: автоматические (системы LIDAR) и полуавтоматические, использующие фиксированные опорные точки для позиционирования.

6.1. LIDAR – это активная технология ди-

станционного зондирования, использующая лазерные датчики. Существует два типа датчиков LIDAR: дальномеры и сканеры. Дальномеры аналогичны автоматическим ультразвуковым системам, характеризуются одним лазерным лучом, излучаемым передатчиком и отражаемым от препятствия [29]. Для измерения расстояния от устройства до препятствия используется метод ToF. Сканер же характеризуется сканирующей плоскостью, собирает полную информацию о времени возврата лазерных лучей и представляет информацию об исследуемой области в виде 3D-облака точек [30]. Как правило, для моделирования полной среды одного сканирования недостаточно, а управление облаком точек довольно сложно, поэтому сканеры LIDAR обычно имеют высокую цену. Точность LIDAR может достигать миллиметров. В [31] данные LIDAR объединяются с данными ИНС для компенсации ошибок, вызванных изменяющейся плоскостью сканирования. Данные LIDAR также используются для оценки ошибок, вызванных MEMS-датчиками, с помощью фильтра Калмана.

6.2. Опорные системы позиционирования. Полуавтоматические системы используют фиксированные опорные точки для определения местоположения мобильных устройств с помощью световых сигналов. При этом передатчик может быть установлен стационарно, а приемник – на БПЛА или наоборот. В опорных системах используется множество методов. Для систем с одним входом и одним выходом обычно применяется RSS, для нескольких входов и выходов – угол прибытия (Angle of Arrival – AoA) или ToA [28]. В этой технологии используется широкий диапазон длин волн (включая видимый свет и инфракрасный), обеспечивающий высокую пропускную способность для целей связи. Преимуществами системы являются гибкость, низкая стоимость, простота развертывания при сохранении высокой производительности (точность в пределах нескольких сантиметров). Недостатками этой системы являются проблема затухания из-за многолучевости и влияние внешних световых условий (солнечный свет, искусственное освещение). Кроме того, опорные системы предъявляют высокие требования к прямой видимо-

сти (LOS), что является большой проблемой при позиционировании в помещении, где присутствует много препятствий.

Как упоминалось ранее, каждая технология имеет свои преимущества и недостатки, поэтому комбинированные подходы для преодоления слабых сторон отдельных технологий являются перспективным направлением. В таблице приведено сравнение технологий позиционирования и навигации БПЛА в помещениях. Технологии оцениваются по следующим параметрам: точность, рабочий диапазон, стоимость, а также их преимущества и недостатки.

Система позиционирования Lighthouse (Valve Lighthouse – LH) изначально разрабатывалась для приложений виртуальной реальности, но затем, ввиду потенциала в области локализации и картирования, система была доработана для внутреннего позиционирования роботов [32–34]. Преимуществами этой системы являются низкая стоимость, простота в транспортировке и использовании, а также возможность автономной работы без центрального компьютера. Точность системы LH для контроллеров и устройств слежения была показана в [34, 35]. В [36] реализовали систему внутреннего позиционирования для БПЛА с использованием 1 или 2 станций LH. Программное обеспечение с открытым исходным кодом может работать на БПЛА в режиме реального времени и запускать алгоритм децентрализованной фильтрации. Система позиционирования LH состоит из двух основных частей: станции и сенсорной платы. Станция LH состоит из вращающихся барабанов, формирующих плоскости инфракрасного света. В настоящее время существует 2 версии станции LH (рис. 2): LH1 содержит 2 вращающихся барабана, расположенных перпендикулярно; LH2 содержит один вращающийся барабан с 2 наклонными плоскостями. LH2 превосходит LH1 по конструкции, при этом снижаются затраты на производство. Сенсорная плата включает 4 датчика, способных обнаруживать плоскости инфракрасного света от LH, и вычисляет на этой основе положение БПЛА в системе координат, связанной со станцией.

Для внутреннего позиционирования БПЛА предложено два основных метода (рис. 3): метод пересекающихся лучей при использовании

Сравнение технологий позиционирования и навигации БПЛА в помещениях

Comparison of UAV positioning and navigation technologies in indoor environments

Технология	Точность	Рабочий диапазон	Стоимость	Преимущества	Недостатки
Оптический поток	~ 10 см	От 80 мм до бесконечности	Средняя	Компактность, стабильность	Невозможность отображения пространства, большой объем встроенных вычислений
Ультразвук	3...4 см	До 2...3 м	Низкая	Низкая стоимость, мощность	Влияние температуры и влажности
UWB	Несколько см	~ 100 м	Высокая	Высокая устойчивость к многолучевому распространению	Высокая стоимость
RFID	1...5 м	~ 100 м	Низкая	Простая реализация	Низкая точность, влияние многолучевого распространения
WLAN	1 м	50...100 м	Низкая	Повторное использование инфраструктуры	Низкая точность, компромисс между точностью и сложностью
Bluetooth	2 м	5...10 м	Низкая	Низкое потребление и стоимость	Низкая точность
Захват движения	Несколько мм	~30 м	Высокая	Высокая скорость, высокое разрешение	Высокая стоимость, требование специальной установки для работы
ИНС	Несколько см	∞	Низкая	Автономность, высокая частота обновления, высокая стабильность	Накопление ошибок с течением времени
LIDAR	Несколько мм	~ 10 м	Высокая	Высокая точность и надежность	Большой объем встроенных вычислений, нестабильность в больших помещениях, проблемы вблизи границ стекла
Опорная световая система	1...2 см	4...5 м	Низкая	Гибкость, низкая стоимость, простота реализации	Проблема затухания из-за многолучевости и влияние внешних световых условий

2 станций и модель измерения расширенного фильтра Калмана для 1 станции. Для оценки точности системы в каждом случае авторы сравнили полученные данные с данными системы захвата движения (ошибка системы захвата движения в пределах миллиметров считается исходными данными для сравнения с другими системами). Полученные результаты показывают, что точность LH2 выше, чем у LH1, благодаря механической простоте конструкции и улучшенным возможностям калибровки. Кроме того, метод с использованием измерения расширенного фильтра Калмана обеспечивает более низкую эффективность, чем метод пересекающихся лучей как для LH1, так и для LH2. Это говорит о том, что помехи от ИНС больше, чем от ЛН. Точность этой системы находится в пределах от 2 до 5 см. Наконец, виден потенциал системы ЛН, которая

станет заменой дорогостоящей системы отслеживания движения. Благодаря доступной цене и возможности автономной работы это интересная технология для будущих исследований.

Система захвата движения. С развитием технологий на основе технического зрения системы захвата движения становятся одной из наиболее передовых технологий в области воспроизведения движения объектов. Можно назвать такие системы, как Vicon, Qualisys, OptiTrack, причем OptiTrack является самой современной системой на сегодняшний день. Как и другие системы захвата движения, OptiTrack (рис. 4) использует высокоскоростные камеры с градуировкой по яркости для отслеживания пассивных меток, освещенных инфракрасным светом с длиной волны около 860 нм [37]. Метками здесь служат шарики

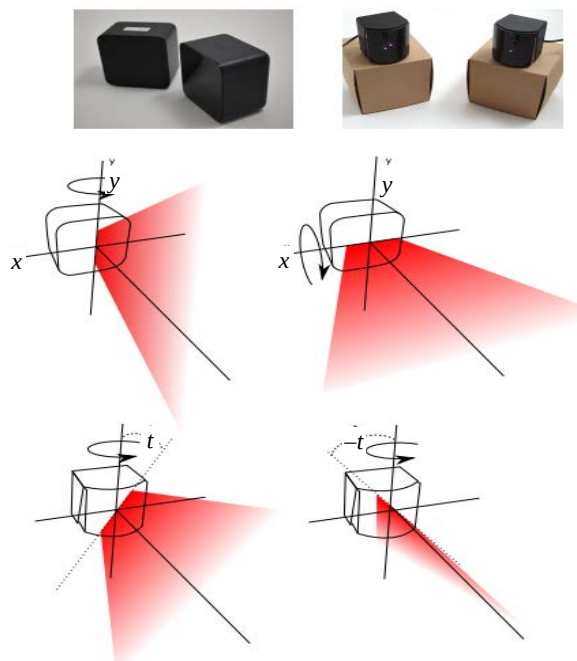


Рис. 2. Две версии станции Lighthouses и принцип их работы [36]

Fig. 2. Two versions of the Lighthouses station and their operating principle [36]

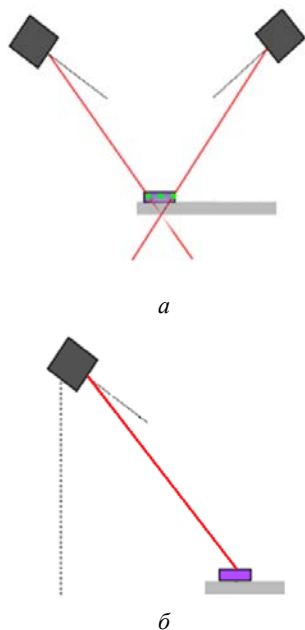


Рис. 3. Два метода позиционирования: а – пересекающихся лучей; б – модель измерения расширенного фильтра Калмана [36]

Fig. 3. Two positioning methods: а – crossing beam method; б – extended Kalman filter measurement model [36]

размером около 6.7 мм, отражающие инфракрасный свет от камеры. Система OptiTrack отличается от других систем захвата движения возможностью высокоточного отслеживания 6



Рис. 4. OptiTrack-камера [38]

Fig. 4. OptiTrack camera [38]

степеней свободы, низкой задержкой, а также возможностью работы в условиях внешней освещенности (солнечный свет, искусственное освещение) благодаря мощным стробоскопам и специально разработанным полосовым фильтрам [38]. Точность позиционирования БПЛА (рис. 5) составляет менее 0.3 мм для положения и менее 0.5° для ориентации. Наименьшая погрешность наблюдается в центральной области системы, где метки могут быть обнаружены всеми камерами. Область обзора также является преимуществом системы, поскольку расстояние обзора может достигать 30 м.



Рис. 5. Системы OptiTrack для БПЛА в помещении [38]

Fig. 5. OptiTrack systems for UAV in indoor environment [38]

Единственным недостатком системы OptiTrack, как и других систем захвата движения, является стоимость развертывания (30 тыс. евро), что подходит только для профессиональных лабораторий. Снижение стоимости, а также упрощение структуры системы станет направлением развития в будущем, поскольку эта технология является одной из лидирующих в области локализации и картирования.

Заключение. В данной статье был предложен обзор систем навигации БПЛА во внут-

ренной среде. Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки. Технология на основе технического зрения представляет собой перспективное направление для систем навигации, особенно в помещениях, и включает в себя две основные системы: ЛН и захвата движения. Система захвата движения выделяется высокой точностью, но высокие затраты делают ее неподходящей для популярных при-

менений. Система ЛН широко развивается, так как обладает высокой точностью и возможностью устранения влияния окружающего освещения. Недостатком этой системы является ограниченный радиус действия и высокие требования к линии зрения. Поэтому сочетание системы ЛН с другими системами (ИНС, оптический поток и т. д.) будет предметом исследований в будущем.

Список литературы

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends // J. of Intell Robot Syst. 2017. Vol. 87. P. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013. P. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
3. A novel distributed architecture for UAV indoor navigation / L. Yuntian, M. Scanavino, E. Capello, F. Dabbene, G. Guglieri, A. Vilaridi // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 35. P. 13–22. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003
4. Review of UAV positioning in indoor environments and new proposal based on US measurements / M. C. Pérez, D. Gualda, J. Vicente-Ranera, J. M. Villadangos, J. Ureña // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Italy, 10 March 2019. CEUR: Ljubljana, Slovenia, 2019. P. 1–8.
5. Muhammad A. Comparative Study of Indoor Navigation Systems for Autonomous Flight // Telecommunication Computing Electronics and Control. 2018. Vol. 16, № 1. P. 118–128. doi: 10.12928/telkomnika.v16i1.6814
6. Roth S., Black M. J. On the spatial statistics of optical flow // Intern. J. of Computer Vision. 2007. Vol. 74, № 1. P. 33–50. doi: 10.1109/ICCV.2005.180
7. Black M. J., Anandan P. The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise-smooth flow fields // Computer Vision and Image Understanding. 1996. Vol. 63, № 1. P. 75–104. doi: 10.1006/cviu.1996.0006
8. Lucas B. D., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proc. of Imaging Understanding Workshop. 1981. P. 121–130.
9. Horn B., Schunck B. Determining optical flow // Artificial Intelligence. 1981. Vol. 17. P. 185–203. doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2
10. Srinivasan M. V. An image interpolation technique for the computation of optical flow and ego-motion // Biological Cybernetics. 1994. Vol. 71. P. 401–415. doi: 10.1007/BF00198917
11. Kendoul F., Fantoni I., Nonami K. Optic flow-based vision system for autonomous 3d localization and control of small aerial vehicles // Robotics and Autonomous Systems. 2009. Vol. 57, № 6. P. 591–602. doi: 10.1016/j.robot.2009.02.001
12. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant key-points // Intern. J. of Computer Vision. 2004. Vol. 2, № 60. P. 91–110. doi: 10.1023/B%3AAVISI.0000029664.99615.94
13. The Use of Optical Flow for UAV Motion Estimation in Indoor Environment / Z. Yu, W. Tingting, C. Zhihao, W. Yingxun, Y. Zhenxing // IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Nanjing, 12–14 Aug. 2016. IEEE, 2016. P. 785–790. doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828885
14. Fausto F., Ju-Hyeon H. Visual Inertial Navigation for a Small UAV Using Sparse and Dense Optical Flow // Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS), Cranfield, UK, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019. P. 206–212. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999672
15. Micro unmanned aerial vehicle visual servoing for cooperative indoor exploration / P. Rudol, M. Wzorek, G. Conte, P. Doherty // Aerospace Conf., Sky, USA, 01–08 March 2008. IEEE, 2008. P. 1–10. doi: 10.1109/AERO.2008.4526558
16. 3D Indoor Positioning of UAVs with Spread Spectrum Ultrasound and Time-of-Flight Cameras / J. A. Paredes, F. J. Álvarez, T. Aguilera, J. M. Villadangos // Sensors. 2017. Vol. 18, № 1. P. 89. doi: 10.3390/s18010089
17. 3D Position Estimation of an UAV in Indoor Environments using an Ultrasonic Local Positioning System / D. Gualda, J. Ureña, M. C. Pérez, H. Posso, S. Bachiller, R. Nieto // 9th Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Nantes, France, 24–27 Sept. 2018. IFSTTAR, 2018. P. 212808.
18. Daly D., Melia T., Baldwin G. Concrete Embedded RFID for Way-Point Positioning // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010. P. 1–10.
19. Tiemann J., Wietfeld C. Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Sapporo, Japan, 18–21 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2017.8115937
20. Multi-modal mapping and localization of unmanned aerial robots based on ultra-wideband and RGB-D sensing / F. J. Perez-Grau, F. Caballero, L. Merino, A. Viguria // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 24–28 Sept. 2017. IEEE, 2017. P. 3495–3502. doi: 10.1109/IROS.2017.8206191

21. The interrogation footprint of RFID-UAV: electromagnetic modelling and experimentations / G. Casati, M. Longhi, D. Latini, F. Carbone, S. Amendola, F. Frate, G. Schiavon, G. Marrocco // IEEE J. of Radio Frequency Identification. 2017. Vol. 1, iss. 2. P. 155–162. doi: 10.1109/JRFID.2017.2765619
22. Alajami A., Moreno G., Pous R. Design of a UAV for Autonomous RFID-Based Dynamic Inventories Using Stigmergy for Mapless Indoor Environments // Drones. 2022. Vol. 6, iss. 8. P. 208. doi: 10.3390/drones6080208
23. Wi-Fi Positioning: System Considerations and Device Calibration / T. Vaupel, J. Seitz, F. Kiefer, S. Haimmerl, J. Thielecke // Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010. P. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5646207
24. Indoor Localization of Unmanned Aerial Vehicles Based on RSSI / B. R. Stojkoska, J. Palikrushev, K. Trivodaliev, S. Kalajdziski // 17th Intern. Conf. on Smart Technologies. IEEE EUROCON, Ohrid, Macedonia, 06–08 July 2017. IEEE, 2017. P. 120–125. doi: 10.1109/EUROCON.2017.8011089
25. A UAV Patrol System Based on Bluetooth Localization / M. Zhou, J. Lin, S. Liang, W. Du, L. Cheng // 2nd Asia-Pacific Conf. on Intelligent Robot Systems, Wuhan, China, 16–18 June 2017. IEEE, 2017. P. 205–209. doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986094
26. Unmanned Quadcopter Control Using a Motion Capture System / L. L. Gomes, L. Leal, T. R. Oliveira, J. P. V. S. Cunha, T. C. Revoredo // IEEE Latin America Transactions. 2016. Vol. 14, iss. 8. P. 3606–3613. doi: 10.1109/TLA.2016.7786340
27. Vision-Controlled Micro Flying Robots / D. Scaramuzza, M. C. Achtelik, L. Doitsidis et al. // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2014. Vol. 21, iss. 3. P. 26–40. doi: 10.1109/MRA.2014.2322295
28. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®. 2nd Ed. Boca Raton, 2019. 540 p. doi: 10.1201/9781315151724
29. LIDAR-inertial integration for UAV localization and mapping in complex environments / R. Opromolla, G. Fasano, G. Rufino, M. Grassi, A. Savvaris // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Arlington, USA, 07–10 June 2016. IEEE, 2016. P. 649–656. doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502580
30. Ole R., Lars G. LiDAR from drones employed for mapping archaeology – potential, benefits and challenges // Archaeological Prospection. 2018. Vol. 25, iss. 4. P. 329–338. doi: 10.1002/arp.1712
31. LIDAR/MEMS IMU integrated navigation (SLAM) method for a small UAV in indoor environments / R. Li, J. Liu, L. Zhang, Y. Hang // DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Karlsruhe, Germany, 16–17 Sept. 2014. IEEE, 2014. P. 1–15. doi: 10.1109/InertialSensors.2014.7049479
32. DronOS: Aflexible open-source prototyping framework for interactive drone routines / M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, T. Kosch // Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM), 26 Nov. 2019. P. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642
33. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance bounds in positioning with the vive lighthouse system // IEEE Intern. Conf. on Information Fusion (FUSION), Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019. P. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242
34. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research // i-Perception. 2017. Vol. 8, iss. 3. doi: 10.1177/2041669517708205
35. Ikbali M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698
36. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research / A. Taffanel, B. Rousselot, J. Danielsson, K. McGuire, K. Richardsson, M. Eliasson, T. Antonsson, W. Hönig. URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (дата обращения: 12.08.2024)
37. OptiTrack Motion Capture System. URL: <https://www.sdu.dk/en/forskning/sduuascenter/aboutsduuascenter/sduuastestcenter/motioncapturelab> (дата обращения: 10.04.2022)
38. OptiTrack for Robotics. URL: <https://optitrack.com/applications/robotics/> (дата обращения: 20.01.2024).

Информация об авторах

Боронахин Александр Михайлович – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов: разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

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

Нгуен Куок Хань – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант Государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов: инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236, Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам
E-mail: nguyenuockhanh183@gmail.com

Нгуен Чонг Иен – кандидат технических наук по направлению "Электроника, фотоника, приборостроение и связь" (2023), сотрудник отдела "Система бортового управления" Академии наук и технологий (Ханой, Вьетнам). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов: инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Академия наук и технологий, 18, Хоанг Куок Вьет, Кауэзай, Ханой, Вьетнам

E-mail: trongyen@lqdtu.edu.vn

<https://orcid.org/0000-0003-4330-8542>

References

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends. *J. of Intell Robot Syst.* 2017, vol. 87, pp. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A Survey of Optical Flow Techniques for UAV Navigation Applications. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013, pp. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
3. Yuntian L., Scanavino M., Capello E., Dabbene F., Guglieri G., Vilardi A. A Novel Distributed Architecture for UAV Indoor Navigation. *Transportation Research Procedia*. 2018, vol. 35, pp. 13–22. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003
4. Pérez M. C., Gualda D., Vicente-Ranera J., Villadangos J. M., Ureña J. Review of UAV Positioning in Indoor Environments and New Proposal Based on US Measurements. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Italy*, 10 March 2019. CEUR, Ljubljana, Slovenia, 2019, pp. 1–8.
5. Muhammad A. Comparative Study of Indoor Navigation Systems for Autonomous Flight. *Telecommunication Computing Electronics and Control*. 2018, vol. 16, no. 1, pp. 118–128. doi: 10.12928/telkomnika.v16i1.6814
6. Roth S., Black M. J. On the Spatial Statistics of Optical Flow. *Intern. J. of Computer Vision*. 2007, vol. 74, no. 1, pp. 33–50. doi: 10.1109/ICCV.2005.180
7. Black M. J., Anandan P. The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields. *Computer Vision and Image Understanding*. 1996, vol. 63, no. 1, pp. 75–104. doi: 10.1006/cviu.1996.0006
8. Lucas B. D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. *Proc. of Imaging Understanding Workshop*. 1981, pp. 121–130.
9. Horn B., Schunck B. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*. 1981, vol. 17, pp. 185–203. doi: 10.1016/0004-3702(81)90024-2
10. Srinivasan M. V. An Image Interpolation Technique for the Computation of Optical Flow and Egomotion. *Biological Cybernetics*. 1994, vol. 71, pp. 401–415. doi: 10.1007/BF00198917
11. Kendoul F., Fantoni I., Nonami K. Optic Flow-Based Vision System for Autonomous 3d Localization and Control of Small Aerial Vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*. 2009, vol. 57, no. 6, pp. 591–602. doi: 10.1016/j.robot.2009.02.001
12. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Key-Points. *Intern. J. of Computer Vision*. 2004, vol. 2, no. 60, pp. 91–110. doi: 10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94
13. Yu Z., Tingting W., Zhihao C., Yingxun W., Zhenxing Y. The Use of Optical Flow for UAV Motion Estimation in Indoor Environment. *IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conf.*, Nanjing, 12–14 Aug. 2016. IEEE, 2016. P. 785–790. doi: 10.1109/CGNCC.2016.7828885
14. Fausto F., Ju-Hyeon H. Visual Inertial Navigation for a Small UAV Using Sparse and Dense Optical Flow. *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*, Cranfield, UK, 25–27 Nov. 2019. IEEE, 2019, pp. 206–212. doi: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999672
15. Rudol P., Wzorek M., Conte G., Doherty P. Micro Unmanned Aerial Vehicle Visual Servoing for Cooperative Indoor Exploration. *Aerospace Conf., Sky, USA*, 01–08 March 2008. IEEE, 2008, pp. 1–10. doi: 10.1109/AERO.2008.4526558
16. Paredes J. A., Álvarez F. J., Aguilera T., Villadangos J. M. 3D Indoor Positioning of UAVs with Spread Spectrum Ultrasound and Time-of-Flight Cameras. *Sensors*. 2017, vol. 18, no. 1, p. 89. doi: 10.3390/s18010089
17. Gualda D., Ureña J., Pérez M. C., Posso H., Bachiller S., Nieto R. 3D Position Estimation of an UAV in Indoor Environments using an Ultrasonic Local Positioning System. *9th Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Nantes, France*, 24–27 Sept. 2018. IFSTTAR, 2018, p. 212808.
18. Daly D., Melia T., Baldwin G. Concrete Embedded RFID for Way-Point Positioning. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010, pp. 1–10.
19. Tiemann J., Wietfeld C. Scalable and Precise Multi-UAV Indoor Navigation Using TDOA-Based UWB Localization. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sapporo, Japan, 18–21 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2017.8115937
20. Perez-Grau F. J., Caballero F., Merino L., Viguria A. Multi-Modal Mapping and Localization of Unmanned Aerial Robots Based on Ultra-Wideband and RGB-D Sensing. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, Canada, 24–28 Sept. 2017. IEEE, 2017, pp. 3495–3502. doi: 10.1109/IROS.2017.8206191
21. Casati G., Longhi M., Latini D., Carbone F., Amendola S., Frate F., Schiavon G., Marrocco G. The Interrogation Footprint of RFID-UAV: Electromagnetic Modelling and Experimentations. *IEEE J. of Radio Frequency Identification*. 2017, vol. 1, iss. 2, pp. 155–

162. doi: 10.1109/JRFID.2017.2765619

22. Alajami A., Moreno G., Pous R. Design of a UAV for Autonomous RFID-Based Dynamic Inventories Using Stigmergy for Mapless Indoor Environments. *Drones*. 2022, vol. 6, iss. 8, p. 208. doi: 10.3390/drones6080208

23. Vaupel T., Seitz J., Kiefer F., Haimerl S., Thielecke J. Wi-Fi Positioning: System Considerations and Device Calibration. *Intern. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Zurich, Switzerland, 15–17 Sept. 2010. IEEE, 2010, pp. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5646207

24. Stojkoska B. R., Palikrushev J., Trivodaliev K., Kalajdziski S. Indoor Localization of Unmanned Aerial Vehicles Based on RSSI. 17th Intern. Conf. on Smart Technologies. *IEEE EUROCON*, Ohrid, Macedonia, 06–08 July 2017. IEEE, 2017, pp. 120–125. doi: 10.1109/EUROCON.2017.8011089

25. Zhou M., Lin J., Liang S., Du W., Cheng L. A UAV Patrol System Based on Bluetooth Localization. 2nd Asia-Pacific Conf. on Intelligent Robot Systems, Wuhan, China, 16–18 June 2017. IEEE, 2017, pp. 205–209. doi: 10.1109/ACIRS.2017.7986094

26. Gomes L. L., Leal L., Oliveira T. R., Cunha J. P. V. S., Revoredo T. C. Unmanned Quadcopter Control Using a Motion Capture System. *IEEE Latin America Transactions*. 2016, vol. 14, iss. 8, pp. 3606–3613. doi: 10.1109/TLA.2016.7786340

27. Scaramuzza D., Achtelek M. C., Doitsidis L. et al. Vision-Controlled Micro Flying Robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2014, vol. 21, iss. 3, pp. 26–40. doi: 10.1109/MRA.2014.2322295

28. Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB®. 2nd Ed. Boca Raton, 2019, 540 p. doi: 10.1201/9781315151724

29. Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M., Savvaris A. LIDAR-Inertial Integration for UAV Localization and Mapping in Complex Environments. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Arlington, USA, 07–10 June 2016. IEEE, 2016, pp. 649–656. doi: 10.1109/ICUAS.2016.7502580

30. Ole R., Lars G. LiDAR from Drones Employed for Mapping Archaeology – Potential, Benefits and Challenges. *Archaeological Prospection*. 2018, vol. 25, iss. 4, pp. 329–338. doi: 10.1002/arp.1712

31. Li R., Liu J., Zhang L., Hang Y. LI-DAR/MEMS IMU Integrated Navigation (SLAM) Method for a Small UAV in Indoor Environments. *DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Karlsruhe, Germany, 16–17 Sept. 2014. IEEE, 2014, pp. 1–15. doi: 10.1109/InertialSensors.2014.7049479

32. Hoppe M., Burger M., Schmidt A., Kosch T. DronOS: Aflexible Open-Source Prototyping Framework for Interactive Drone Routines. *Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM)*, 26 Nov. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642

33. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance Bounds in Positioning with the Vive Lighthouse System. *IEEE Intern. Conf. on Information Fusion (FUSION)*, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242

34. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *I-Perception*. 2017, vol. 8, iss. 3. doi: 10.1177/2041669517708205

35. Ikbāl M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

36. Taffanel A., Rousselot B., Danielsson J., McGuire K., Richardsson K., Eliasson M., Antonsson T., Hönig W. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (accessed: 12.08.2024)

37. OptiTrack Motion Capture System. Available at: <https://www.sdu.dk/en/forskning/sduuascenter/aboutsduuascenter/sduuastestcenter/motioncapturelab> (accessed: 10.04.2022)

38. OptiTrack for Robotics. Available at: <https://optitrack.com/applications/robotics/> (accessed: 20.01.2024).

Information about the authors

Alexander M. Boronakhin – Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020), Professor of the Department of Laser Measuring and Navigation Systems, Dean of the Faculty of Information Measuring and Biotechnical Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of railway traffic. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Nguyen Quoc Khanh – Master of Science in Instrumentation Engineering (2020), PhD student at Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of three scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems. Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Co Nhue, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam
E-mail: nguyenvuocquoc183@gmail.com

Nguyen Trong Yen – PhD in Electronics, Photonics, Instrumentation and Communications (2023), member of the On-Board Control System Department, Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam). The author of 10 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems. Address: Vietnam Academy of Science and Technology, 18, Hoang Quoc Viet, Cau Giay, Hanoi, Vietnam
E-mail: trongyen@lqdtu.edu.vn

Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер

М. Е. Комнатнов✉

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

✉ maxmek@mail.ru

Аннотация

Введение. Электромагнитное экранирование применяют как дополнительное конструкторское средство обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (РЭС). Материал экрана выбирают на основе его известных электрофизических параметров на стадии проектирования РЭС, учитывая электрические и эксплуатационные характеристики. Эффективность экранирования (ЭЭ) композитных, слоистых или тканых материалов с высокой электрической проводимостью и относительной магнитной проницаемостью в широком диапазоне частот (от 10 Гц до 10 ГГц) оценить сложно, а в некоторых случаях невозможно. Между тем довольно мало исследований по этой теме проводится в настоящее время.

Цель работы. Систематизировать модели и методы вычисления и измерения вносимых потерь (ВП) и ЭЭ материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер в широком диапазоне частот.

Материалы и методы. Описана методика вычисления ВП для электрической (E -) и магнитной (H -) компонент поля на основе измеренных S -параметров в сдвоенной ТЕМ-камере. Предложены выражения для вычисления ненагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры, отличающиеся учетом толщины материала и оснастки, предотвращающей провисание тонкого материала в ней, и позволяющие уменьшить разницу между измеренными и вычисленными значениями S -параметров до 3,2 дБ. Описаны методы измерения и вычисления ЭЭ композитных материалов, результаты которых сравнены с полученными стандартизированной методикой вычисления ЭЭ.

Результаты. Представлены частотные зависимости ВП для E - и H -полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с размещенными внутри хлопчатобумажной и трикотажной экранирующими тканями. Сравнены вычисленные результаты классической модели и электродинамического моделирования с экспериментальными для композитного материала в новой запатентованной коаксиальной ТЕМ-камере.

Заключение. Модели и методы вычисления и измерения ВП и ЭЭ могут быть эффективно использованы при относительно быстром контроле и тестировании новых и известных экранирующих материалов с учетом приведенных допущений и ограничений.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, коаксиальная камера, эффективность экранирования, композитные материалы, экранирующая ткань

Для цитирования: Комнатнов М. Е. Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 19–37. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-19-37

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование поддержано Российским научным фондом (проект 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>).

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; принята к публикации после рецензирования 26.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell

Maxim E. Komnatnov✉

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

✉ maxmek@mail.ru

Abstract

Introduction. Electromagnetic shielding is used as an additional design tool to ensure electromagnetic compatibility of electronic devices. The shielding material is selected based on its electrophysical parameters at the design stage of electronic devices, taking its electrical and operational characteristics into account. The shielding effectiveness (SE) of composite, layered, or fabric materials with a high electrical conductivity and relative magnetic permeability in a wide frequency range (10 Hz...10 GHz) is difficult and, in some cases, impossible to assess a priori. At the same time, the number of studies in this direction is currently limited.

Aim. To generalize models and methods for calculating and measuring the insertion losses (IL) and SE of materials using dual and coaxial TEM cells in a wide frequency range.

Materials and methods. A method for calculating IL for the electric (E) and magnetic (H) components of the field based on the measured S parameters in a dual TEM cell is described. Expressions for calculating an unloaded dual TEM cell are proposed. These expressions differ in terms of considering the thickness of the material and the tooling that prevents sagging of thin materials, thus allowing the difference between the measured and calculated values of S parameters to be reduced to 3.2 dB. Methods for measuring and calculating the SE of composite materials are described. The results obtained using these methods are compared with those obtained by a standardized method for SE calculation.

Results. The frequency dependencies of the IL for the E and H fields calculated on the basis of the measured S parameters of a dual TEM cell with a cotton and knitted shielding fabric placed inside are presented. The results obtained by the classic and electrodynamic modeling are compared with experimental results for a composite material in a new patented coaxial TEM cell.

Conclusion. Models and methods for calculating and measuring IL and SE can be effectively used for a relatively rapid control and testing of new and available shielding materials, taking the above assumptions and limitations into account.

Keywords: electromagnetic compatibility, TEM cell, coaxial cell, shielding effectiveness, composite materials, shielding fabric

For citation: Komnatnov M. E. Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 19–37. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-19-37

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

Source of financing. The research was supported by the Russian Science Foundation (project 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>) at Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Submitted 04.04.2024; accepted 26.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Одним из видов дестабилизирующих воздействий, оказывающих влияние на нормальную работу радиоэлектронного средства (РЭС), являются излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП). Помехоустойчивость РЭС к воздействию ЭМП оценивают на стадии проектирования при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) создаваемого

РЭС. Как правило, при проектировании РЭС применяют различные методы и способы вычисления и средства измерения помехоустойчивости и помехозащищенности РЭС к воздействию ЭМП [1]. Широко известным конструкторским средством обеспечения ЭМС узлов, блоков и систем РЭС является электромагнитное экранирование [2, 3]. Оно локализует элек-

тромагнитное излучение (ЭМИ) в заданной области пространства, ослабляя электромагнитным экраном воздействие источника на рецептор ЭМП [4]. Ослабление электромагнитным экраном воздействующей ЭМП определяется отражением электромагнитной волны (ЭМВ) от границ раздела экрана и среды, в которой он находится, а также поглощением и потерей энергии ЭМВ при ее прохождении через экран и многократных переотражениях внутри экрана [2–5]. Кроме того, на ослабление ЭМВ экраном влияют отверстия (апертуры) в его стенках [6]. Основным показателем качества экрана, характеризующим его способность ослаблять амплитуду ЭМП, является эффективность экранирования (ЭЭ), анализ которой может быть выполнен исходя из теории линий передачи (ЛП) или теории поля. В общем случае ЭЭ определяется через отношение напряженностей электрического (E) или магнитного (H) поля в заданной области пространства в присутствии (E_1 и H_1) и отсутствии (E_0 и H_0) электромагнитного экрана [4]:

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg |E_0/E_1|; \text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg |H_0/H_1|. \quad (1)$$

Размеры, форма и материал электромагнитного экрана, а также его расположение влияют на ослабление ЭМП в требуемом диапазоне частот [2]. Использование легких материалов, обладающих высокой удельной электрической проводимостью (σ) и/или относительной магнитной проницаемостью (μ_r), является преимуществом при проектировании экранов современных РЭС [7, 8]. При проектировании электромагнитного экрана в основном используют моделирование, позволяющее учесть электрофизические параметры материала [9], которые не всегда могут быть доступны разработчику, что затрудняет создание оптимального и высокоэффективного экрана. Создание на стадии проектирования оптимального электромагнитного экрана, обладающего приемлемой ЭЭ в заданном диапазоне частот, является сложной задачей, поскольку ЭЭ существенно зависит от его формы и размеров, электрофизических параметров материалов, расположения источника и приемника ЭМП, в целом конструкции РЭС и пр. Кроме того, из-за сложности вычисления ЭЭ реальной конструкции раз-

работчиками не всегда своевременно принимаются меры для обеспечения ЭМС РЭС, что в значительной мере увеличивает стоимость его разработки на конечном этапе проектирования. Для корректного учета электрофизических параметров экранирующих материалов на стадии проектирования необходимо вычислять и измерять их ЭЭ, что позволит улучшить массогабаритные показатели и электромагнитные свойства изготавливаемой экранирующей конструкции и РЭС в целом.

Цель работы – систематизировать существующие модели и методы вычисления и измерения ЭЭ материалов с использованием двохвостных и коаксиальных ТЕМ-камер.

Известные методы вычисления и измерения экранирующих материалов. При проектировании экранирующей конструкции изначально выбирают материалы, в качестве которых могут использоваться металлы и их сплавы, композитные материалы (КМ), радиоткани и пр. Кроме того, уделяют внимание расположению экрана. Если он вблизи (в ближней зоне) источника ЭМП, применяют металлы с высокой μ_r (ферромагнетики), такие как железо, электротехническая сталь и пр., которые эффективны для ослабления низкочастотных магнитных полей. При экранировании высокочастотных электрических и магнитных полей (в дальней зоне) используют материалы с высокой σ , например медь, алюминий и пр. Экранирование широкополосных источников ЭМП может также осуществляться многослойными КМ или материалами из нескольких слоев металла и их сплава, имеющих различные электрофизические параметры [10].

В общем случае, согласно [4], источник ЭМП характеризуется длиной волны излучения (λ) и расстоянием от источника до экрана ($l/2$). Точка наблюдения p находится за экраном на том же удалении $l/2$. Электромагнитный экран характеризуется толщиной материала (t_m) и его электрофизическими параметрами σ , ϵ , μ . На рис. 1 представлено ортогональное падение на экран ЭМВ, распространяющейся вдоль оси z . В ближней зоне, где $l < \lambda/\pi$, поле еще не сформировалось в плоскую ЭМВ и представляет собой либо электрическое (высокоомное), либо магнитное (низкоомное) поле, в зависимости от

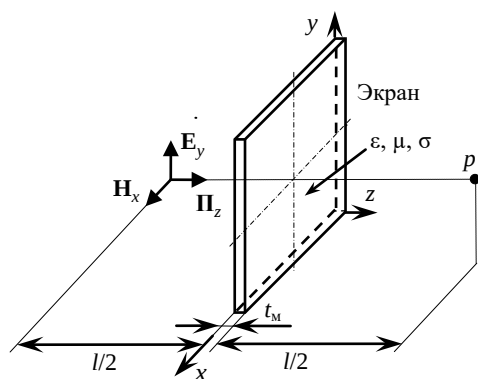


Рис. 1. Анализируемая модель плоского бесконечно протяженного однородного электромагнитного экрана

Fig. 1. Model of a flat infinitely extended homogeneous electromagnetic shield

электрических характеристик источника ЭМП, а в дальней зоне, где $l > 2\lambda/\pi$, поле формируется в плоскую ЭМВ. Основным принципом действия экрана является то, что при воздействии поля источника на поверхности экрана индуцируются заряды, а в его толще – токи и магнитная поляризация. Они создают вторичное поле. При сложении вторичного и первичного полей образуется результирующее поле, которое в защищаемой области пространства оказывается слабее первичного [11].

Модель, рассмотренная в руководстве [12] к выполнению требований европейского авиакосмического стандарта ECSS-E-ST-20-07C [13], описывает вычисление ЭЭ материалов, применяемых в космических аппаратах (КА). Модель, основанная на теории ЛП и изменении волнового сопротивления на границах сред, описывает физические процессы отражения, поглощения и передачи плоской ЭМВ для однородных изотропных сред [4]. Модель подтверждена сравнением результатов моделирования в [14] и измерений. Согласно решению уравнений Максвелла в дифференциальной форме, модель плоского однородного металлического экрана (считающегося линейной системой с протяженностью, достаточной для исключения влияния краевого эффекта) аналогична описанным моделям из [2, 3]. Упрощение и блок-схема вычисления ЭЭ материала экрана с использованием данной модели приведены в [15]. В общем случае ЭЭ может быть вычислена аналитически, независимо от точки расположения источника и/или приемника ЭМП. Со-

гласно классической теории [4], ЭЭ плоского однородного экрана определяется [2, 3, 12, 15] суммой коэффициентов $A_{\text{дБ}} + R_{\text{дБ}} + M_{\text{дБ}}$ ослаблений ЭМВ, вызванных: тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов в металле $A_{\text{дБ}}$; отражением от границ раздела диэлектрик–экран и экран–диэлектрик при воздействии поля источника в дальней $R_{\text{дБ}}^T$ или ближней $R_{\text{дБ}}^{E,H}$ зоне; многократным внутренним переотражением $M_{\text{дБ}}^{T,E,H}$ внутри экранирующего материала. Эти коэффициенты ослабления [4] для электропроводящих материалов связаны с S-параметрами [16].

Частотные зависимости ЭЭ материалов измеряют для корректного учета значений их электрофизических параметров на стадии проектирования экранирующей конструкции. Измерения проводят, используя пять наиболее известных [17, 18] методов. Так, применяя методы измерения на основе стандартов IEEE 299–2006 [19] (заменяет широко известный MIL-STD-285 [20]) и IEEE 299.1–2013 [21], можно определить ЭЭ корпуса с апертурой при ее перекрытии материалом, для размеров корпусов свыше 2 м [19] и до 2 м [21] соответственно. Измерения проводят в достаточно широком диапазоне частот – от 9 кГц до 18 ГГц, с возможным расширением нижнего предела до 50 Гц, а верхнего – до 100 ГГц. Данный метод измерения требует высокой подготовки специалиста, а также разнообразного и дорогостоящего оборудования (безэховая или реверберационная камера, генератор, усилитель, измерительный приемник, разные виды антенн и пр.), которое не всегда может быть доступно разработчику. Альтернативный метод измерения ЭЭ материала приведен в стандарте ASTM D4935 [22], заменившем в настоящее время стандарт ASTM E7 [23]. Данный метод позволяет измерять ЭЭ различных материалов [24] с использованием коаксиальной камеры [25, 26] в диапазоне частот от 30 МГц до 1.5 ГГц. Метод имеет достаточно хорошую точность и сходимость результатов измерения с результатами вычисления [27], используя широко известную модель [4], описанную в [12].

Также проводят измерения ЭЭ материалов с использованием прямоугольных и круглых волноводов [28, 29], состоящих из двух коаксиально-волноводных переходов и двух регулярных прямоугольных частей, между которыми размещается исследуемый материал. Другой метод измерения ЭЭ материала основан на подходе, предложенном в [30] и использующем две одинаковые ТЕМ-камеры [31], симметрично расположенные относительно их апертур, образуя сдвоенную ТЕМ-камеру. Каждый из этих методов измерений имеет ряд ограничений [17] на диапазон рабочих частот, геометрические размеры, форму и структуру образца материала, а также его электрофизические свойства и ориентацию векторов напряженностей E - и H -полей, воздействующих на материал. Кроме того, прямое измерение ЭЭ возможно провести, используя IEEE 299–2006 [19], который также хорошо согласуется с моделью [4]. Остальные методы предполагают пересчет измеренных значений, например S -параметров, в значения ЭЭ.

Альтернативные [4] аналитические модели и метод измерения на их основе предложены группой из национального бюро стандартизации США и основаны на измерении отношения мощностей в сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камерах без учета материала в апертуре и с ним [25, 30]. Используя вычисленные или измеренные значения мощностей на портах камер, а также их известные геометрические и электрические параметры, можно вычислить вносимые потери (ВП) и ЭЭ материала для поля ближней [32] и дальней [26] зон соответственно. Используя выражения из [33], можно пересчитать ВП для поля ближней зоны и хорошо проводящего экранирующего материала в ЭЭ. Данный метод позволяет на основе измеренных S -параметров вычислить ЭЭ в диапазоне низких частот для металлических и неметаллических экранирующих материалов [34], а также экранирующих сеток [35], пленок [36] и тканей [37].

Методы вычисления и измерения ЭЭ поля ближней зоны для материалов в сдвоенной ТЕМ-камере. Метод вычисления ЭЭ на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры [30] предполагает измерения ответвленной мощности ЭМВ от передающей в приемную ТЕМ-камеру [38] (рис. 2).

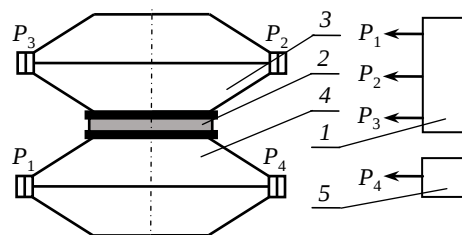


Рис. 2. Схема подключения ВАЦ к сдвоенной ТЕМ-камере

Fig. 2. Connection diagram of the VNA to a dual TEM cell

Отношение мощностей без учета и с учетом материала, расположенного в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры, позволяет вычислить ВП материалом [30, 38], которые с использованием коэффициентов из [32] пересчитываются в ЭЭ. Вычисление коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ для сдвоенной ТЕМ-камеры основано на теории малых апертур [39] и электромагнитной связи, через апертуру двух симметрично расположенных ТЕМ-камер [30, 32, 38], а также на подходе [40], использующем векторный анализатор цепей (ВАЦ). Подход (рис. 2) заключается в измерении посредством ВАЦ 1 отношения мощностей наведенных токов и напряжений через нагруженную и ненагруженную апертуру 2, на портах P_2 и P_3 приемной ТЕМ-камеры 3 по отношению к мощности P_1 передающей ТЕМ-камеры 4, на противоположном конце которой к порту P_4 подключена согласованная нагрузка 5 с заданным волновым сопротивлением Z_B .

Амплитуду и фазу S -параметров измеряют на прямом S_{21} и обратном S_{31} портах приемной ТЕМ-камеры относительно передающей для ненагруженной (без материала) и нагруженной (с материалом) апертуры, в диапазоне частот до 1 ГГц [30]. На основе отношения измеренных S -параметров ненагруженной к нагруженной апертуре вычисляют значения ВП и ЭЭ для E - и H -компонент поля для металлических, композитных, тканых и слоеных экранирующих материалов, размещенных в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры. Особенностью данного метода являются отличия ориентации векторов E - и H -полей относительно материала. Так, вектор E направлен по нормали к измеряемому материалу, а H – тангенциально, что наиболее близко имитирует реальную печатную плату (ПП) с компонентами, покрытыми

экранирующим материалом, поскольку он может быть расположен в непосредственной близости к компонентам.

Модель для вычисления S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры без материала в апертуре содержит основные уравнения, описывающие электромагнитную связь, выражающуюся комплексными коэффициентами возбуждения a_0 и b_0 через электрически малую ненагруженную апертуру входящих в ее состав камер [30]. Вычисление коэффициентов передачи $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ с использованием a_0 и b_0 сводится к определению ответвленной мощности ЭМВ от передающей ТЕМ-камеры 4 в приемную ТЕМ-камеру 3, через ненагруженную материалом апертуру 2 (рис. 2). Для ненагруженной апертуры мощность ЭМВ, прошедшей в приемную ТЕМ-камеру 3 в прямом $P_2 = |a_0|^2/2$ и обратном $P_3 = |b_0|^2/2$ направлениях, нормированная по отношению к входной мощности P_1 , может быть выражена через S -параметры как [38, 40]

$$|S_{21}| = 10 \lg \left(\frac{1}{2} |a_0|^2 \right); |S_{31}| = 10 \lg \left(\frac{1}{2} |b_0|^2 \right). \quad (2)$$

При условии симметричного расположения апертуры ($x = z = 0$) и распространения в ней T -волны уравнения для комплексных коэффициентов возбуждения a_0 и b_0 записываются как [38]

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{jk_0}{2\eta_0} (a_{ey} + a_{mx}) E_{iy}^2; \\ b_0 &= \frac{jk_0}{2\eta_0} (a_{ey} - a_{mx}) E_{iy}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_0 = \omega(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$ и $\eta_0 = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ – коэффициент распространения и характеристическое сопротивление ЭМВ в свободном пространстве соответственно (ω – круговая частота; $\epsilon_0 = (1/36\pi)10^{-9}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная и диэлектрическая постоянные соответственно); a_{ey} и a_{mx} – электрическая и магнитная компоненты поляризуемости апертуры при распространении в ней T -волны; E_{iy} – y -компонента электрического поля в передающей ТЕМ-камере.

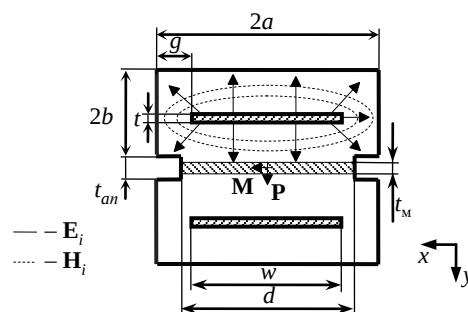


Рис. 3. Поперечное сечение сдвоенной ТЕМ-камеры

Fig. 3. Cross section of a dual TEM cell

Компонента E_{iy} электрического поля для T -волны в передающей ТЕМ-камере может быть найдена из геометрических параметров a , b , g , w и характеристического сопротивления $Z_{\text{ТЕМ}}$ ТЕМ-камеры (рис. 3) как [38, 40]

$$E_{iy} = \frac{2}{a} \sqrt{Z_{\text{ТЕМ}}} \sum_{m_0=1}^{\infty} \frac{\sin(Ma)}{\text{sh}(Mb)} J_0(Mg), \quad (4)$$

где a и b – половина ширины и высоты симметричной ТЕМ-камеры; $g = (2a - w)/2$ – зазор между центральным проводником шириной w ТЕМ-камеры и ее внешним проводником; m_0 – относится к суммированию только по нечетным m ($m = 1, 3, 5, \dots$) числам; $M = m\pi/(2a)$; J_0 – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка.

Характеристическое сопротивление ТЕМ-камеры согласно [38] находится как

$$Z_{\text{ТЕМ}} = \frac{\eta_0 \pi}{8 \left[\ln \left(\frac{8a}{\pi g} \right) - \sum_{m_0=1}^{\infty} \frac{2}{m} (1 - \text{cth}(Mb)) \right]}. \quad (5)$$

Уравнения (3)–(5) являются основными [30, 38] для описания электромагнитной связи через электрически малую апертуру двух ТЕМ-камер. Противоположные знаки для a_0 и b_0 в (3) подразумевают, что мощность ЭМВ асимметрично проникает через апертуру от передающей ТЕМ-камеры в приемную. При этом компоненты a_{ey} и a_{mx} будут иметь противоположные знаки, значение b_0 будет больше по модулю, чем a_0 ($|a_0| < |b_0|$), что аналогично работе обратного ответвителя для сдвоенной ТЕМ-камеры.

Электромагнитная связь между двумя ТЕМ-камерами с общей апертурой описывается компонентами электрического a_{ey} и магнитного a_{mx} полей, направленными нормально (y) и тангенциально (x) по отношению к апертуре и материалу в ней. Так, для ненагруженной круглой апертуры с заданным радиусом r или квадратной с заданной длиной стороны d компоненты поля могут быть найдены как [38]

$$\begin{aligned} a_{ey} &= -\frac{2}{3}r^3 = -\frac{0.455d^3}{4}; \\ a_{mx} &= \frac{4}{3}r^3 = \frac{1.032d^3}{4}. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом в (6) не учитывается толщина стенок ТЕМ-камеры и расстояние между ними t_{an} , которое может образоваться при размещении материала с заданной t_m в некоторой вспомогательной конструкции, удерживающей его (см. рис. 3) и устраняющей провисание, например радиоткани.

Коррекцию толщины можно провести, используя уравнения из [39], описывающие связь электрических и магнитных компонент поля, через электрически малую апертуру любой толщины. Поскольку в квадратной апертуре электрический дипольный момент ($\mathbf{p}$) перпендикулярен апертуре и, следовательно, продолжен для волновода, которым является апертура, то $\mathbf{p}$ будет возбуждать ТМ-моды. При этом TM_{11} является первой модой для квадратного поперечного сечения. Для магнитного дипольного момента ($\mathbf{m}$) аналогично будут возбуждаться режимы как TE , так и TM . Таким образом, в апертуре будут возбуждаться моды низшего порядка, возбуждаемые индивидуально $\mathbf{p}$ и $\mathbf{m}$ в режиме TE_{10} , который аналогичен режиму возбуждения в ТЕМ-камере. Тогда, используя в соответствии с [38] уравнения из [39], можно получить значения безразмерных коэффициентов (R_E и R_H) для квадратной апертуры с длиной стороны d , а, учитывая для режимов TM_{11} и TE_{10} постоянные распространения β_{11}^{TM} и β_{10}^{TE} для волны в волноводе, которым представляется апертура сдвоенной ТЕМ-

камеры высотой t_{an} , выражения для компонент поля можно записать как

$$\begin{aligned} a_{ey} &= -R_E d^3 e^{-t_{an}\beta_{11}^{TM}} = -0.11d^3 e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi}; \\ a_{mx} &= R_H d^3 e^{-t_{an}\beta_{10}^{TE}} = \frac{1}{4}d^3 e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подстановка (6) и (7) в (3) позволяет получить комплексные коэффициенты возбуждения без учета толщины стенок ТЕМ-камеры и конструкции для крепления исследуемого материала:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.577 \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0}; \\ b_0 &= -1.487 \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

и с их учетом

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0} \left(e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi} - \frac{11}{25} e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}} \right); \\ b_0 &= -\frac{jk_0 d^3 E_{iy}^2}{8\eta_0} \left(e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi} + \frac{11}{25} e^{-\frac{t_{an}}{d}\pi\sqrt{2}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

В результате, подставив (9) в (2), можно вычислить частотные зависимости коэффициентов передачи в прямом $|S_{21}|$ и обратном $|S_{31}|$ направлениях для ЭМВ, проходящей через квадратную апертуру от передающей ТЕМ-камеры в приемную, с учетом толщин конструкции камеры и оснастки для материала.

Далее описана модель для вычисления S-параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с материалом в апертуре. Решение интегрального уравнения Фредгольма для идеально проводящей пластины с круглой апертурой радиусом r , нагруженной проволочной сеткой, позволило получить численную и аналитическую модели, учитывающие поляризуемости в отверстиях и электромагнитные потоки, прошедшие через них, а также контактное сопротивление (R_K) между сеткой и пластиной [36]. На основе данного решения получена упрощенная модель для нагруженной листовым материалом апертуры и вычисления его ВП в сдвоенной ТЕМ-камере [30]. Согласно модели, ВП листовым материалом для компонент E - и H -полей могут быть вычислены

через комплексные коэффициенты для ненагруженной (a_0 , b_0) и нагруженной (a'_0 , b'_0) апертуры двойной ТЕМ-камеры как

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left| \frac{a_0 + b_0}{a'_0 + b'_0} \right|; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left| \frac{a_0 - b_0}{a'_0 - b'_0} \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

В [35] решение из [36] применено при сравнении результатов теоретических и экспериментальных данных ВП, которые в [32] уточнены для тонких экранирующих пленок и представлены как

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left| \frac{j8\eta_0}{3\pi k_0 r_e Z_M} \left(1 + 8\pi \frac{Z_K}{Z_M} \right)^{-1} \right|; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left| 1 + \frac{j4k_0 r_h \eta_0}{3\pi Z_M} \left(1 + 2\pi \frac{Z_K}{Z_M} \right)^{-1} \right|, \end{aligned} \quad (11)$$

где $Z_M = \eta / \text{sh}(-jkt_M)$ – эквивалентное сопротивление материала тонкой пленки; Z_K – контактное сопротивление материала с апертурой [35, 36]; $r_e = 0.555d$ и $r_h = 0.579d$ – радиусы апертуры ТЕМ-камеры или соответствующие значения для прямоугольной апертуры с длиной стороны d , полученные в соответствии с (6) [38]; $k = \omega [\mu(\epsilon - j\sigma/\omega)]^{1/2}$ и $\eta = [j\omega\mu/(\sigma + j\omega\epsilon)]^{1/2}$ – коэффициент распространения и характеристическое сопротивление ЭМВ материала [41] соответственно; $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ и $\mu = \mu_0\mu_r$ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды соответственно.

Как видно из (11), значения вычисленных ВП существенно зависят от двух параметров Z_M и Z_K , которые могут быть неизвестны для исследуемого материала. Кроме того, значение Z_K зависит от плотного прилегания исследуемого материала к кромке апертуры двойной ТЕМ-камеры и детально исследуется в [26], но обычно считается реальным (активным) значением сопротивления r_K [30, 32, 38, 40]. В [36] оно нормировано и соответствует $Z_K = 2\pi r_K / Z_M$, а в [40] к Z_K последовательно включалось емкостное сопротивление, что имитировало неодно-

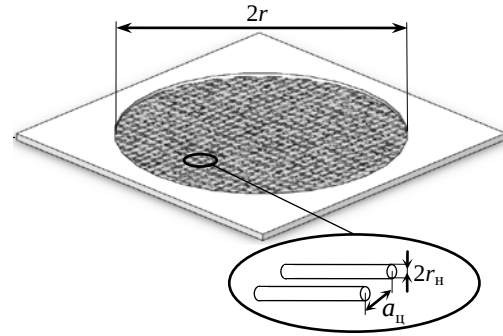


Рис. 4. Модель сетчатого электромагнитного экрана из металлических нитей

Fig. 4. Model of a mesh electromagnetic shield

родность в местах соприкосновения материала и ТЕМ-камер. При этом истинное значение Z_K определить сложно, а в некоторых случаях невозможно, что ограничивает применение данного метода вычисления и измерения ЭЭ.

Для сетчатого электромагнитного экрана [35, 36] из металлических нитей (рис. 4) Z_M зависит от диаметра нити (d_n), воздушного квадратного окна [42], определяемого расстоянием a_n между центрами нитей ($a_n \ll \lambda$), и электропроводности материала нити (σ_n). Значение Z_M металлической сетки [35] вычисляется при известных поверхностном сопротивлении (R_c) и индуктивности (L_c) сетчатого экрана из металлических нитей. При этом Z_M сетки из металлических нитей может быть найдено как $Z_M = R_c + j\omega L_c$, а необходимые R_c и L_c определяются как

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{4a_n}{\pi d_n^2 \sigma_n} \frac{\Delta J_0(\Delta)}{2J_1(\Delta)}; \\ L_c &= \frac{\mu_0 a_n}{2\pi} \ln \left[\frac{1}{1 - e^{-\pi d_n / a_n}} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где J_1 – модифицированная функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка; $\Delta^2 = j\omega\tau_d$ ($\tau_d = \mu_{rn}\sigma_n r_n^2$ – постоянная времени диффузии; μ_{rn} – относительная магнитная проницаемость материала металлической нити).

Упрощение R_c в (12) может быть выполнено согласно [35], где последний член выражения

$\Delta J_0(\Delta)/[2J_1(\Delta)]$ может быть приравнен к 1 при условии, что $\omega\tau_d < 1$. Тогда R_c будет учитывать только сопротивление нити по постоянному току на единицу длины металлической сетки. При этом полное нормированное контактное сопротивление апертуры ТЕМ-камеры с экраном из металлических нитей может быть определено как $Z_k = 2\pi r_k (a_{ц} R_c)^{-1}$. Выражения (12) применимы только для сетчатого металлического экрана [35] и не применимы для экранирующей ткани, поскольку не учитывают ее плетение или плотное прилегание нитей между собой.

Измеренные ВАЦ или вычисленные при помощи электродинамического моделирования S -параметры сдвоенной ТЕМ-камеры, с размещенным в ее электрически малой апертуре материалом, согласно [40] можно пересчитать в ВП, подставив (2) в (10):

$$\begin{aligned} \text{ВП}_E &= 20 \lg \left[\frac{S_{21\text{ненагр}} + S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} + S_{31\text{нагр}}} \right]; \\ \text{ВП}_H &= 20 \lg \left[\frac{S_{21\text{ненагр}} - S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} - S_{31\text{нагр}}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Связь между измеренными ВП и ЭЭ в ближней зоне описана в [33]. При этом измерение и вычисление по (1) ЭЭ материала в ближней зоне предполагает его размещение между двумя близко расположенными электрическими или магнитными диполями (см. рис. 1). Применяя коэффициент $K_{E,H}$ из [33] для хорошо проводящих электромагнитных экранов, учитывая расстояние ($k_0 l \ll 1$) от источника до приемника ЭМИ при расположении между ними (посередине) электромагнитного экрана, а также радиус апертуры (r_e, r_h), ЭЭ можно вычислить на основе измеренных S -параметров как

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_E &= K_E \text{ВП}_E = \\ &= 20 \lg \left[\frac{8}{3\pi} \frac{l}{r_e} \frac{S_{21\text{ненагр}} + S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} + S_{31\text{нагр}}} \right]; \\ \text{ЭЭ}_H &= K_H \text{ВП}_H = \\ &= 20 \lg \left[\frac{8}{3\pi} \frac{3r_h}{l} \frac{S_{21\text{ненагр}} - S_{31\text{ненагр}}}{S_{21\text{нагр}} - S_{31\text{нагр}}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученные результаты могут быть сравнены с широко известной моделью, описанной на основе аналогии с ЛП из [2, 12], предполагающей вычисление коэффициентов A, R, M .

Методы вычисления и измерения ЭЭ поля дальней зоны для материалов в коаксиальной ТЕМ-камере. ЭЭ композитных, слоистых материалов в коаксиальной камере рассчитывают на основе измеренных или вычисленных S -параметров, а также определяют их аналитически на основе известных электрофизических параметров (σ, ϵ, μ) материала с заданной t_m . S -параметры измеряют при помощи ВАЦ 1 (рис. 5) для ненагруженной и нагруженной материалом коаксиальной ТЕМ-камеры.

Измерение ЭЭ образца материала в коаксиальной камере основано на определении потерь при распространении ЭМВ вдоль нагруженной образцом материала камеры (рис. 6) [26].

Из-за разницы волновых сопротивлений среды распространения η_0 и образца материала η падающая волна P_i отражается от поверхности образца. Отраженная ЭМВ имеет мощность P_r . Мощность P_a частично поглощается

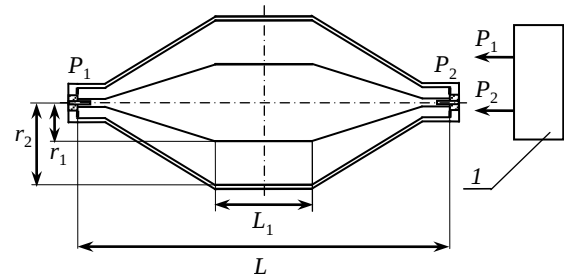


Рис. 5. Схема подключения ВАЦ к коаксиальной камере и ее геометрические параметры

Fig. 5. Connection diagram of the VNA to the coaxial cell and its geometric parameters

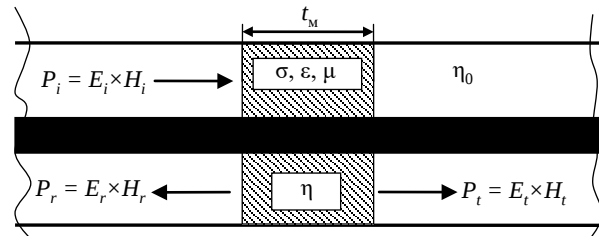


Рис. 6. Модель распространения ЭМВ в нагруженной образцом материала коаксиальной камере

Fig. 6. Model of electromagnetic wave propagation in a coaxial cell loaded with a material sample

образцом, а мощность P_t частично проникает через экран, что выражается в равенство мощностей $P_i = P_r + P_a + P_t$. Мощности отраженной (по порту 1) P_r и прошедшей P_t от порта 1 в порт 2 ЭМВ определяются через S -параметры как

$$|S_{11}|^2 = \frac{P_r}{P_i}; |S_{21}|^2 = \frac{P_t}{P_i}. \quad (15)$$

В результате выражение (15) для вычисления ЭЭ образца материала принимает вид [22]

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg \left| \frac{S_{21u}}{S_{21l}} \right|, \quad (16)$$

где S_{21u} , S_{21l} – коэффициенты передачи коаксиальной камеры без образца и с образцом соответственно.

Модель для вычисления ЭЭ плоских многослойных экранирующих КМ, выполненных из n слоев с толщиной t_n , представлена в [2, 43]. В данной модели многослойный КМ (рис. 7, а) заменяется согласно [44] эквивалентной схемой из n последовательно соединенных отрезков ЛПП длиной t_n (рис. 7, б). Предполагается, что каждый n -й отрезок ЛПП (рис. 7, б) является однородным и изотропным слоем КМ со своими значениями σ_n , ϵ_{rn} и μ_{rn} , на основе которых вычисляются η_n и k_n .

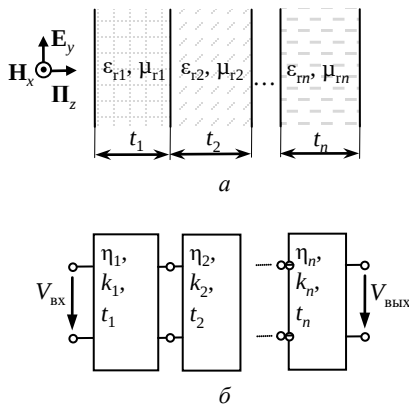


Рис. 7. Многослойный экранирующий КМ (а) и его эквивалентная схема из n отрезков ЛПП (б)

Fig. 7. Multilayer shielding composite material (а) and its equivalent circuit of n TL segments (б)

ЭЭ многослойного КМ вычисляется из отношения напряжений на входе ($V_{\text{вх}}$) и выходе ($V_{\text{вых}}$) эквивалентной схемы. Для их вычисления

используется $ABCD$ -матрица для несимметричного четырехполосника, которая для последовательно соединенных отрезков ЛПП с использованием телеграфных уравнений по аналогии с [2, 43, 45] записывается как

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} \text{ch}(-jk_n t_n) & \eta_n \text{sh}(-jk_n t_n) \\ \frac{\text{sh}(-jk_n t_n)}{\eta_n} & \text{ch}(-jk_n t_n) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

С учетом отражений на границах между слоями КМ результирующая ЭЭ многослойного экрана (рис. 7) вычисляется как [43]

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_{\text{дБ}} &= 20 \lg \left[\frac{V_{\text{вх}}}{V_{\text{вых}}} \right] = \\ &= 20 \lg \left[\frac{A\eta_0 + B\eta_0^2 + C + D\eta_0}{2\eta_0} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Объединив (17) и (18) и приняв КМ однослойным, ЭЭ можно вычислить как

$$\text{ЭЭ}_{\text{дБ}} = 20 \lg \left| \cos(kt_m) - j \left(\frac{\eta^2 + \eta_0^2}{2\eta\eta_0} \right) \sin(kt_m) \right|. \quad (19)$$

Анализ и сравнение результатов вычисления S -параметров и ЭЭ материалов. Изначально вычислены и измерены S -параметры ненагруженных сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Для этого создана модель сдвоенной ТЕМ-камеры из двух ТЕМ-камер (рис. 8, а) с аналогичными ($a = 60.1$ мм, $b = 69.1$ мм, $g = 16$ мм) геометрическими параметрами (см. рис. 3) из [46, 47] и $|S_{11}| \leq -22$ дБ в диапазоне частот до 2 ГГц. Выполнено ее электродинамическое моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ), в диапазоне частот до 1 ГГц. С использованием указанных геометрических параметров ТЕМ-камеры вычислены $Z_{\text{ТЕМ}} = 55.3$ Ом по (5) и частотные зависимости $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ (рис. 9, а) сдвоенной ТЕМ-камеры по (2) с (8) и (9). Собрана экспериментальная установка (рис. 8, б) по схеме, представленной на рис. 2, и измерены частотные зависимости $|S_{11}|$ для каждой ТЕМ-камеры, а также $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ для сдвоенной ТЕМ-камеры с учетом толщин ТЕМ-камер

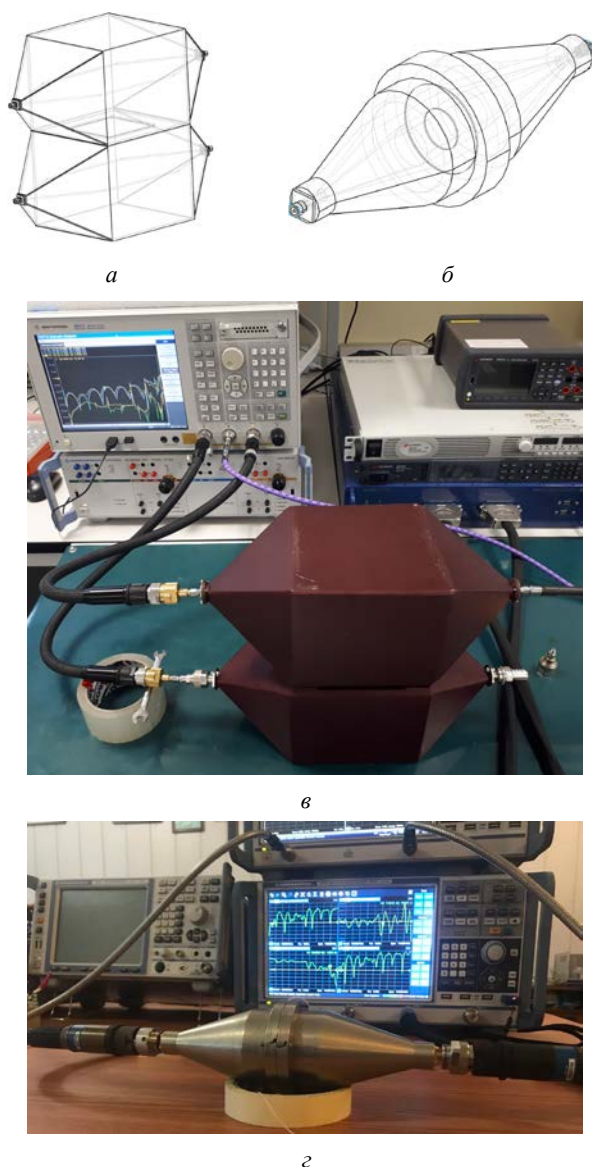


Рис. 8. Электродинамические модели (а, б) для вычисления и экспериментальные установки (в, з) для измерения S -параметров сдвоенной (а, в) и коаксиальной (б, з) ТЕМ-камер

Fig. 8. Electrodynamics models (a, b) for calculating and experimental setups (v, z) for measuring of S -parameters for dual (a, v) and coaxial (b, z) TEM cells

(2 мм) и оснастки (5.5 мм), суммарно $t_{an} = 9.5$ мм (рис. 9, а).

Аналогично создана электродинамическая модель ненагруженной коаксиальной камеры (рис. 8, б) с геометрическими параметрами из [48] и собрана экспериментальная установка по схеме, приведенной на рис. 5. Вычислены S -параметры коаксиальной камеры с использованием МКЭ, а также измерены (рис. 8, з) в диапазоне частот до 12 ГГц.

Анализ вычисленных и измеренных значений $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ из рис. 9, а показал, что на частоте 1 ГГц измеренные значения составили -34.2 дБ для $|S_{31}|$ и -37 дБ для $|S_{21}|$, что ниже вычисленных аналитически по (8) значений 6.6 и 1.2 дБ соответственно. Использование модели с предложенными выражениями (9) ($t_{an} = 9.5$ мм) уменьшает эту разницу до 3.2 и 1 дБ. Вычисленные электродинамическим моделированием значения составили -30.2 дБ и -32.7 дБ для $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ соответственно. Для измеренных значений в диапазоне частот 880...920 МГц проявляется резонансная область из-за оснастки из алюминия в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры. В резонансной области $|S_{21}|$ и $|S_{31}|$ достигают отклонения 14.3 дБ. При этом на вычисленных (аналитическим и электродинамическим методами) частотных зависимостях S -параметров данные резонансы отсутствуют. В связи с этим оснастка должна быть изготовлена из более высокопроводящего материала (меди) и иметь минимальную толщину, что позволит сместить резонанс в область более высоких частот (за 1 ГГц).

Из вычисленных МКЭ и измеренных частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры (рис. 9, б) видно, что $|S_{11}| \leq -18.8$ дБ, а $|S_{21}| \geq -0.2$ дБ для вычисленных значений, тогда как для измеренных $|S_{11}| \leq -16.9$ дБ и $|S_{21}| \geq -0.36$ дБ.

Далее вычислены частотные зависимости ВП и ЭЭ на основе измеренных S -параметров нагруженных сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Изначально вычислены для E - и H -полей частотные зависимости ВП по (11) и ЭЭ на основе коэффициентов A , R , M из [12]. Вычисления проведены на расстоянии 1 м в диапазоне частот 10 Гц...100 МГц (диапазон частот уменьшен с 1 ГГц до 100 МГц для наглядности вычисленных и измеренных результатов). В качестве материала использовалась медь ($\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ См) толщиной $t_m = 254$ мкм, частотные зависимости ЭЭ $_{E,H}$ которой приведены в [12], а также аналогично вычислены и приведены на рис. 10. Сопротивление Z_k в (11) вычислялось для двух случаев.

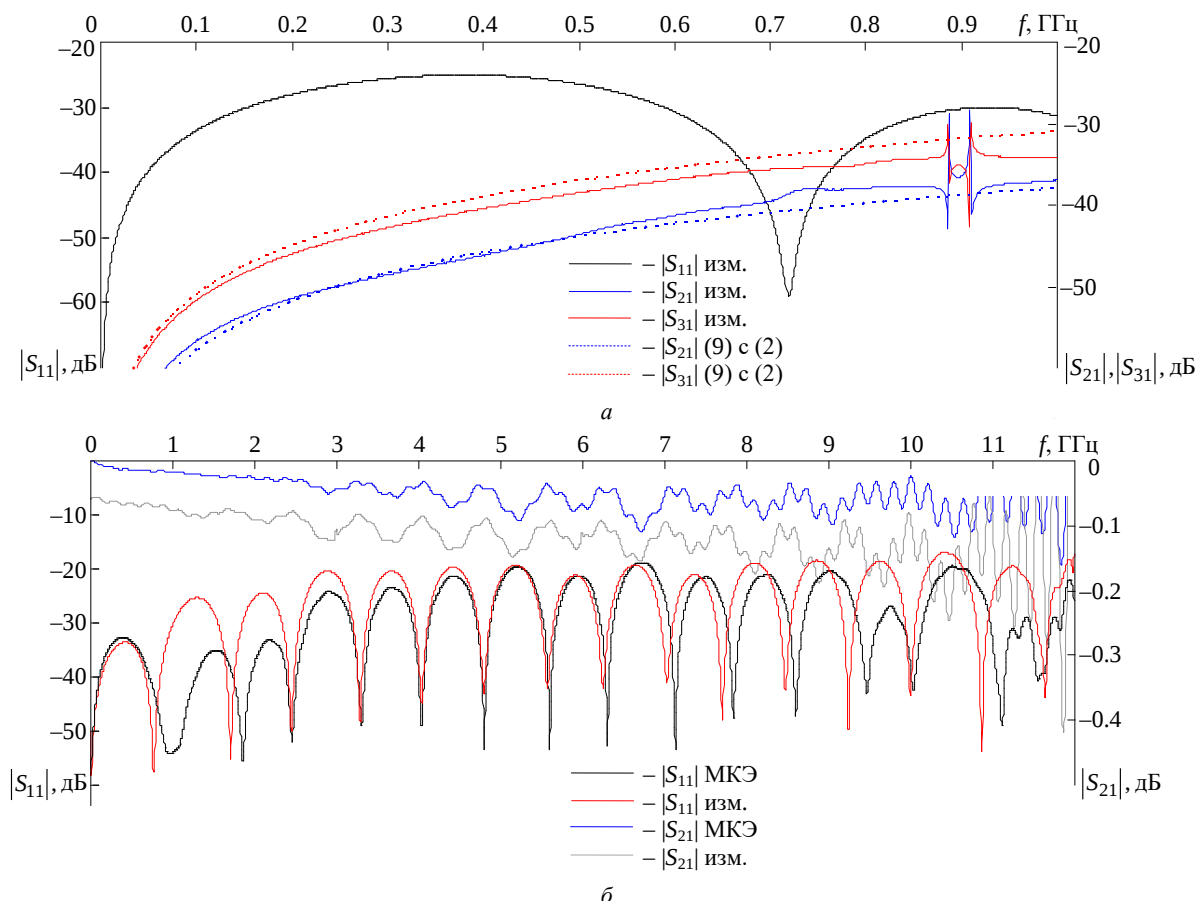


Рис. 9. Вычисленные и измеренные частотные зависимости S-параметров для ненагруженных материалом сдвоенной (а) и коаксиальной (б) ТЕМ-камер

Fig. 9. Calculated and measured frequency dependencies of S-parameters for dual (a) and coaxial (b) TEM cells not loaded with a material

В случае 1 Z_K выбрано как удельное поверхностное сопротивление $Z_K = 1/(\sigma t_M)$ аналогично [38]. В случае 2 Z_K получено из ABCD-параметров для несимметричного Т-образного

четырёхполюсника ($B = Z_1 + Z_2 + (Z_1 Z_2)/Z_3$) в предположении, что соприкосновение исследуемого материала (Z_1, Z_2) с материалом одинаково для двух ТЕМ-камер (Z_3), при отсутствии

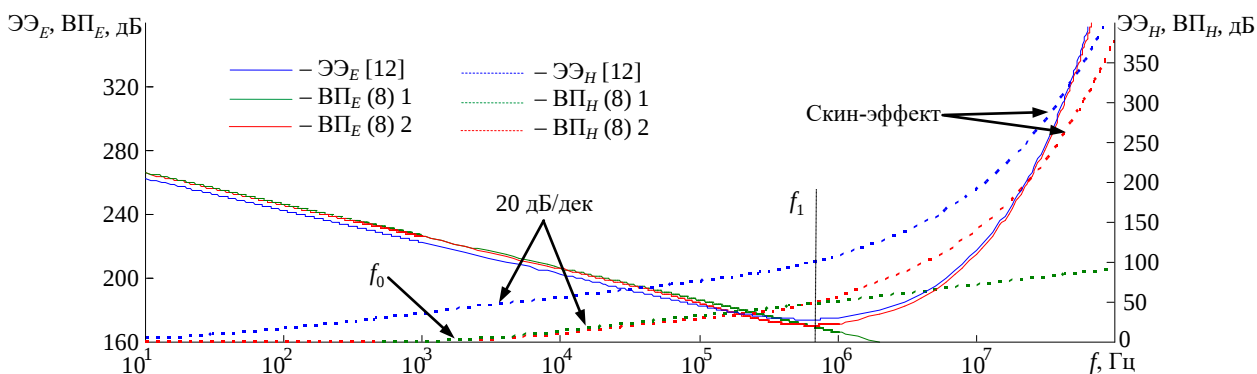


Рис. 10. Вычисленные частотные зависимости ЭЭ и ВП для E- и H-полей, полученные для двух случаев по (8) и с использованием выражений из [12]

Fig. 10. Calculated frequency dependencies of SE and IL for E- and H-fields, obtained for two cases according to (8) and using expressions from [12]

воздушного зазора как $Z_k = 2Z_M + Z_M^2/Z_k$.

Из рис. 10 видно, что для E -поля $ВП_E$ и $ЭЭ_E$ совпадают, а максимальная разница значений до частоты 1 МГц не превышает 5 дБ. При этом для случая 1 $ВП_E$ продолжают убывать и достигают 126 дБ на частоте 100 МГц (на графике не показано), тогда как для случая 2 максимальная разница значений сохраняется.

Для H -поля максимальная разница значений $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ достигает 50 дБ в диапазоне частот $f_0 - f_1$, но при этом возрастание частотных зависимостей сохраняется одинаковым с крутизной 20 дБ/дек. Свыше f_1 разница между $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ уменьшается только для случая 2, тогда как для случая 1 – увеличивается. В результате применения Z_k аналогично случаю 2, полученного на основе $ABCD$ -параметров, возможно получить ВП, схожие по поведению с частотными зависимостями $ЭЭ$ из [12].

Расхождения результатов $ВП_H$ и $ЭЭ_H$ (см. рис. 10) на частотах до f_0 могут объясняться низким сопротивлением контакта между материалом и корпусом ТЕМ-камеры, которое оказывает существенное влияние на распространение H -поля в ней даже при небольшом размере апертуры. Так, учитывая, что плотность тока $\mathbf{J} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}$ прямоугольного резонатора на частоте f_0 связана с его периметром $\Pi = 2(a + b)$ и площадью $S = ab$ поперечного сечения [12], это аналогично может быть применено для ТЕМ-камеры с заданными размерами поперечного сечения a , b и апертуры r_h (6), а также при известных σ и r_k как

$$f_0 = \frac{d}{2\pi\mu_0 S} \left[\frac{\Pi}{\sigma t d} + r_k \right]. \quad (20)$$

Также, используя (20), можно вычислить r_k сдвоенной ТЕМ-камеры с материалом. Из рис. 10 установлено, что при $f_0 = 1990$ Гц значения частотной зависимости $ВП_H$ изменяются в 3 раза (для случаев 1 и 2). Вычисленное по (20) r_k на этой частоте составило 2.83 мОм. Уменьшение r_k в 2 раза (до 1.4 мОм) приводит к уменьшению f_0 до 1121 Гц, а увеличение r_k

в 2 раза (до 6 мОм) к увеличению до 3927 Гц. Аналогичное смещение будет происходить для материалов тонких пленок с низкой σ . На основе вычисленных ВП можно вычислить $ЭЭ$, применив коэффициенты $K_{E,H}$ из (14). При этом, в зависимости от l , значения $ЭЭ$ будут смещаться по амплитуде.

Если в (11) в Z_k взять $r_k \rightarrow 0$, то $ВП_{E,H}$ повторяют поведение $ЭЭ_{E,H}$ (при 3 фОм), а разница в значениях со случаем 2 минимальна. В реальной измерительной установке r_k между материалом и сдвоенной ТЕМ-камерой существенно выше и зависит от исследуемого материала, оснастки, ТЕМ-камер, площади соприкосновения и шероховатости соприкасающихся поверхностей. Это существенно влияет на различия между вычисленными и измеренными значениями.

Измерены S -параметры по схеме из рис. 2 с использованием измерительной установки, приведенной на рис. 8, в. Исследовались экранирующие хлопчатобумажная (рис. 11, а) с $t_m = 300$ мкм и трикотажная (рис. 11, б) с $t_m = 900$ мкм ткани [49], размещенные внутри

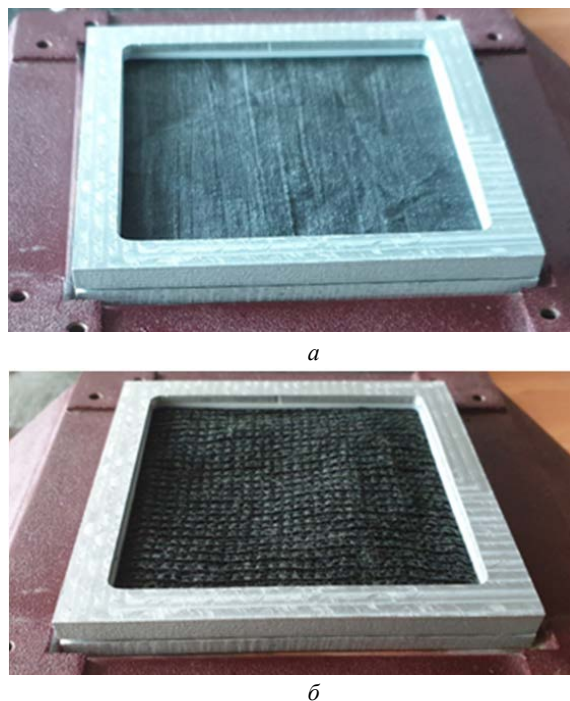


Рис. 11. Хлопчатобумажная (а) и трикотажная (б) экранирующие ткани, размещенные в оснастке в апертуре сдвоенной ТЕМ-камеры

Fig. 11. Cotton (a) and knitted (b) shielding fabrics placed in the snap in the aperture of a dual TEM cell

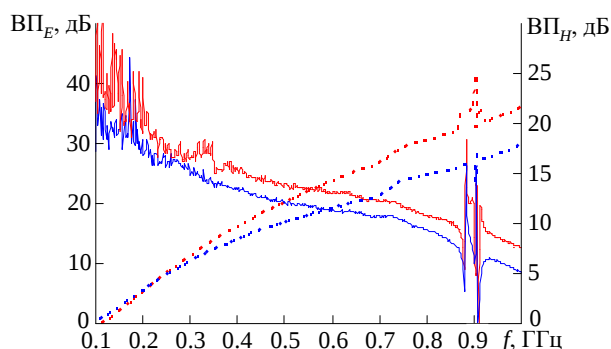


Рис. 12. Частотные зависимости ВП для E - (—) и H - (---) полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров двойной ТЕМ-камеры, для хлопчатобумажной (—) и трикотажной (—) радиотканей

Fig. 12. Frequency dependencies of IL for E - (—) and H - (---) fields, calculated on the basis of measured S -parameters of a dual TEM cell, for cotton (—) and knitted (—) radio fabrics

изготовленной оснастки в виде рамки, предотвращающей провисание ткани.

Измерения проводились при повороте оснастки вокруг собственной оси на каждые 90° . На основе измеренных S -параметров вычислены по (13) и усреднены значения частотных зависимостей $ВП_{E,H}$ экранирующих тканей (рис. 12).

Из рис. 12 видно, что $ВП_{E,H}$ для экранирующих тканей схожи по поведению с $ВП_{E,H}$ полученными для медной металлической пластины. При этом электрофизические параметры тканей неизвестны, а на рис. 12, аналогично рис. 10, наблюдается частота f_0 вблизи 100 МГц.

Выбран КМ с толщиной $t_m = 0.8$ мм. Частотные зависимости электрофизических параметров с учетом потерь ($\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$; $\mu = \mu' + j\mu''$)

предоставлены производителем [50]. КМ имеет радиопоглощающие свойства и может быть эффективно применен в диапазоне высоких частот. Вычислена ЭЭ (рис. 13) КМ с использованием (19). Проведены электродинамическое моделирование с использованием МКЭ и измерения S -параметров нагруженной КМ коаксиальной камеры. Вычислены по (16) и аппроксимированы полиномом 2-й степени частотные зависимости ЭЭ. Для сравнения проведено электродинамическое моделирование КМ с использованием метода матрицы линии передачи (ММЛП) при воздействии на него плоской ЭМВ. При этом модель материала имела бесконечную протяженность, что задавалось за счет размещенных по краям периодических граничных условий. Также аналитически вычислены коэффициенты A , R и M [4] с использованием модели из [2], просуммированы и получена частотная зависимость ЭЭ материала при воздействии плоской ЭМВ.

Из рис. 13 видно, что разница вычисленных и измеренных частотных зависимостей ЭЭ не превышает 1 дБ. При этом измеренные и вычисленные S -параметры коаксиальной камеры при их пересчете в ЭЭ могут быть аппроксимированы для сглаживания и устранения волнообразного характера частотных зависимостей ЭЭ, что не окажет существенного влияния на результаты.

В результате приведенные модели и методы вычисления и измерения могут быть применены при оценке и тестировании новых и известных экранирующих материалов [49, 50] с учетом приведенных допущений и ограничений.

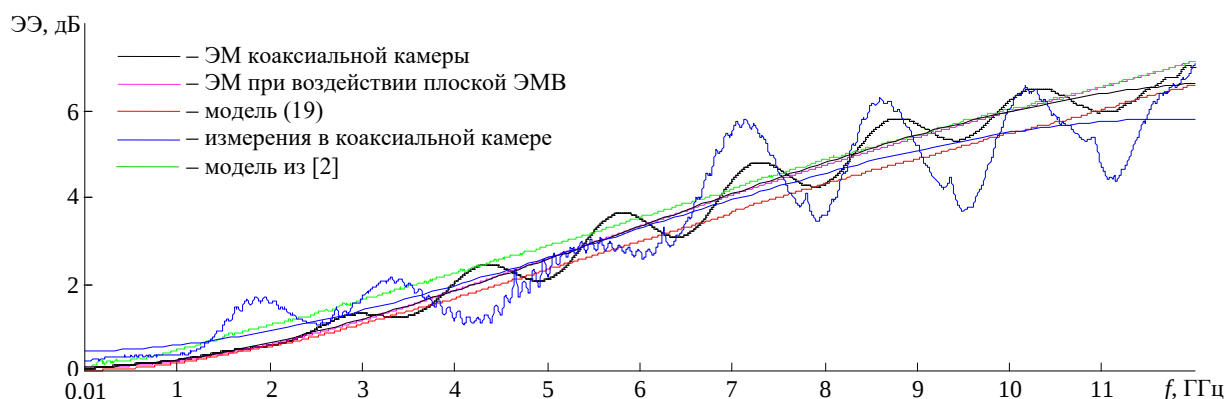


Рис. 13. Вычисленные аналитическим и электродинамическим (ЭМ) методами, а также измеренные частотные зависимости ЭЭ для РПМ [50]

Fig. 13. Calculated by analytical and electrodynamic (EM) methods, as well as measured frequency dependencies of SE for radio absorbing materials [50]

Преимуществом является отсутствие необходимости безэховой или реверберационной камеры, а также антенных измерений. Измерения можно выполнить на рабочем месте инженера, используя ВАЦ и два типа камер в виде сдвоенной и коаксиальной ТЕМ-камер. Автоматизация процесса измерения программными средствами аналогично [51] позволит ускорить процесс оценки ВП и ЭЭ материалов, что важно при производстве и создании новых экранирующих материалов и РЭС в целом.

Заключение. Систематизированы модели и методы вычисления и измерения ВП и ЭЭ материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер в широком диапазоне частот. Описана методика вычисления ВП для E - и H -полей на основе измеренных S -параметров в сдвоенной ТЕМ-камере.

Предложены выражения для вычисления комплексных коэффициентов возбуждения (a_0 и b_0) в модели ненагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры, отличающиеся учетом толщины материала ТЕМ-камеры и оснастки, предотвращающей провисание тонкого материала в ней, и позволяющие уменьшить разницу между измеренными и вычисленными значениями $|S_{31}|$ и $|S_{21}|$ до 3.2 и 1 дБ соответственно.

Сравнены результаты вычисления ВП и ЭЭ с полученными стандартизированной классической моделью. Представлены частотные зависимости ВП для E - и H -полей, вычисленные на основе измеренных S -параметров сдвоенной ТЕМ-камеры с размещенными внутри хлопчатобумажной и трикотажной экранирующими тканями. Предложено на основе несимметричного Т-образного четырехполюсника, вычисление сопротивления контакта Z_k между исследуемым материалом и сдвоенной ТЕМ-камерой. Используя полученные коэффициенты (a_0 и b_0) и известные выражения для ВП, а также выражение для сопротивления контакта Z_k , можно создать модель для вычисления S -параметров нагруженной сдвоенной ТЕМ-камеры с оснасткой, что позволит вычислять ВП материалов с заданными электрофизическими параметрами и сопоставлять результаты вычисления и измерения в сдвоенной ТЕМ-камере с результатами других методов. Сравнены результаты, вычисленные классической моделью и электродинамическим моделированием с экспериментальными результатами для КМ в новой запатентованной коаксиальной ТЕМ-камере. В перспективе результаты предполагается использовать при реализации виртуальных испытаний.

Список литературы

1. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. N. J.: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 989 p.
2. Electromagnetic Shielding: Theory and Applications / S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli, G. Lovat. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2023. 563 p.
3. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 229 с.
4. Schelkunoff S. A. Electromagnetic Waves. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1943. 543 p.
5. Teshe F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis Methods and Computational Models. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997. 623 p.
6. Mendez H. A. Shielding Theory of Enclosures with Apertures // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 1978. Vol. EMC-20, № 2. P. 296–305. doi: 10.1109/TEMC.1978.303722
7. EM Performance of Conductive Composite Laminate Made of Nanostructured Materials for Aerospace Application / V. P. Bui, W. Thitsartarn, E.-X. Liu, J. Y. C. Chuan, E.-K. Chua // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57, № 5. P. 1139–1148. doi: 10.1109/temc.2015.2432831
8. Balan I., Morari C., Patroi E. Composite Materials for Electromagnetic Shielding // U.P.B. Sci. Bull., Series B. 2016. Vol. 78, № 2. P. 233–238.
9. Sevgi L. Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009. Vol. 51, № 1. P. 211–216. doi: 10.1109/map.2009.4939074
10. Shielding Effectiveness of Shields and Their Combined Double-Layer Shields for Low Frequency Pulsed Magnetic Field / Zheng Pan, Yue-bo Li, Jian Zhao, Sheng Jia, Zheng-yu Huang // Proc. of IEEE Intern. Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai, China, 20–22 March 2019. IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/compem.2019.8779048
11. Шапиро Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. 109 с.
12. ECSS-E-HB-20-07A. Space Engineering – Space Systems Electromagnetic Compatibility Handbook. URL: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-20-07a-electromagnetic-compatibility-handbook-5-september-2012/> (дата обращения: 19.08.2024).
13. ECSS-E-ST-20-07C. Space Engineering – Electromagnetic Compatibility. URL: <https://ecss.nl/standard/>

ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/ (дата обращения: 19.08.2024).

14. Ansys HFSS. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-hfss> (дата обращения: 19.08.2024).

15. Ott H. W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. N. J.: John Wiley & Sons, Inc., 1988. 448 p.

16. McDowell A., Hubing T. Analysis and Comparison of Plane Wave Shielding Effectiveness Decompositions // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56, № 6. P. 1711–1714. doi: 10.1109/temc.2014.2332133

17. Ondrejka A. R., Adams J. W. Shielding Effectiveness (SE) Measurement Techniques // Nat. Symp. on Electromagn. Compat., San Antonio, TX, USA, 24–26 Apr. 1984. IEEE, 1984. P. 249–256. doi: 10.1109/ISEMC.1984.7571012

18. Stanescu C., Chita M. A. Some Aspects Regarding the Experimental Methods for Determining the Shielding Effectiveness of Materials in the Microwave Range // Intern. Conf. on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE-2014), Baku, Azerbaijan, 7–8 Sept. 2014. P. 275–278. doi: 10.13140/rg.2.1.4371.5601

19. IEEE Std 299–2006. Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4117954> (дата обращения: 19.08.2024).

20. MIL-STD-285. Method of Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes. URL: <https://www.hftechnology.nl/wp-content/uploads/MIL-STD-285.pdf> (дата обращения: 19.08.2024).

21. IEEE Std 299.1–2013. Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having All Dimensions Between 0.1 m and 2 m. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712029> (дата обращения: 19.08.2024).

22. ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. URL: <https://www.astm.org/d4935-18.html> (дата обращения: 19.08.2024).

23. Badic M., Marinescu M.-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H. F. Range // Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Minneapolis, USA, 19–23 Aug. 2002. IEEE, 2002. P. 29–34. doi: 10.1109/ISEMC.2002.1032442

24. A Test Method for Shielding Effectiveness of Materials against Electromagnetic Pulse Based on Coaxial Flange / Y. Liu, W. Wei, C. Xiang, N. Xin, Z. Mo, J. Rui, L. Jinxi // Energies. 2023. Vol. 16, № 18. P. 6701. doi: 10.3390/en16186701

25. Wilson P. F., Ma M. T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Natl. Bur. Stand. Tech. Note 1095, USA, 1986. 72 p.

26. Wilson P. F., Ma M. T., Adams J. W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Pt. I: Far-Field Source Simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 239–250. doi: 10.1109/15.3302

27. Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz / R. Valente, C. De Ruijter, D. Vlasveld, S. Van Der Zwaag, P. Groen // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 16665–16675. doi: 10.1109/access.2017.2741527

28. Influence of Planar Material Size and Position on Shielding Effectiveness Measurements Using the Dual Waveguide Method / E. Tourounoglou, V. Gkatsi, A. Roc'h, R. Vogt-Ardatjew, H. Schipper, F. Leferink // Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 707–711. doi: 10.1109/emceurope.2019.8871968

29. Rudd M., Baum T.C., Ghorbani K. Determining High-Frequency Conductivity Based on Shielding Effectiveness Measurement Using Rectangular Waveguides // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 69, № 1. P. 155–162. doi: 10.1109/tim.2019.2895930

30. Wilson P. F., Ma M. T. Small Aperture Analysis of the Dual TEM Cell and an Investigation of Test Object Scattering in a Single TEM Cell. National Bureau of Standards, Tech. Note 1076, USA, 1984. 57 p.

31. Crawford M. L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1974. Vol. 16, № 4. P. 189–195. doi: 10.1109/temc.1974.303364

32. Wilson P. F., Ma M. T. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Pt. II: Near-Field Source Simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 251–259. doi: 10.1109/15.3303

33. Wilson P. F. A Comparison between Near-Field Shielding-Effectiveness Measurements Based on Coaxial Dipoles and Electrically Small Apertures // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 1. P. 23–28. doi: 10.1109/15.19884

34. Analyzing the Attenuation of Electromagnetic Shielding Materials for Frequencies Under 1 GHz / V. Voicu, I. Pătru, P. M. Nicolae, L. A. Dina // Proc. of Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania, 23–25 March 2017. IEEE, 2017. P. 336–340. doi: 10.1109/atee.2017.7905057

35. Higgins D. F., Wheeler R., Wenaas E. A Comparison of Theoretical Expressions and Experimental Data for EM Penetration through Small Apertures // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1985. Vol. 32, № 6. P. 4340–4345. doi: 10.1109/tns.1985.4334120

36. Casey K. F. Low-Frequency Electromagnetic Penetration of Loaded Apertures // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1981. Vol. EMC-23, iss. 4. P. 367–377. doi: 10.1109/aps.1992.221738

37. Shielding Effectiveness Evaluation of Metalized and Polypyrrole-Coated Fabrics / J. Avloni, M. Ouyang, L. Florio, A. R. Henn, A. Sparavigna // J. of Thermoplastic Composite Materials. 2007. Vol. 20, iss. 3. P. 241–254. doi: 10.1177/0892705707076718

38. Wilson P. F., Ma M. T. Shielding-Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1985. Vol. EMC-27, iss. 3. P. 137–142. doi: 10.1109/temc.1985.304277

39. McDonald N. A. Electric and Magnetic Coupling through Small Apertures in Shield Walls of Any Thickness // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1972. Vol. 20, iss. 10. P. 689–695. doi: 10.1109/tmtt.1972.1127844

40. Manara A. Measurement of Material Shielding Effectiveness Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1996. Vol. 38, № 3. P. 327–333. doi: 10.1109/15.536062

41. Collin R. E. Field Theory of Guided Waves. 2nd ed. N. J.: Wiley-IEEE Press, 1990. 864 p.

42. Bethe H. A. Theory of Diffraction by Small Holes // Physical Review. 1944. Vol. 66, № 7. P. 163–182. doi: 10.1103/physrev.66.163

43. Shi D., Gao Y., Shen Y. Determination of Shielding Effectiveness of Multilayer Shield by Making Use of Transmission Line Theory // Proc. of Int. Symp. on Electromagn. Compat. and Electromagnetic Ecology. Russia, Saint Petersburg, 26–29 June 2007. IEEE, 2007. P. 1–3. doi: 10.1109/emceco.2007.4371656

44. Schulz R. B., Plantz V. C., Brush D. R. Shielding Theory and Practice // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, № 3. P. 187–201. doi: 10.1109/15.3297

45. Analytical Model and Software for Evaluating the Shielding Materials Properties / A. A. Ivanov, A. A. Kvasnikov, I. A. Onishchenko, A. V. Demakov, S. P. Kuksenko

// IEEE 22nd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Souzga, Russia, 30 June–4 July 2021. IEEE, 2021. P. 1–5. doi: 10.1109/edm52169.2021.9507593

46. ТЕМ-камера для оценки уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных средств с возможностью исследования биологических объектов в диапазоне частот до 2 ГГц / М. Е. Комнатнов, Т. Р. Газизов, О. А. Матвеев // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 4 (67). С. 46–56.

47. Пат. RU 2606173. ТЕМ-камера / М. Е. Комнатнов, Т. Р. Газизов. Опубл. 10.01.2017.

48. Пат. RU 2759079. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов / А. В. Демаков, М. Е. Комнатнов, А. А. Иванов, И. И. Николаев, Т. Р. Газизов. Опубл. 09.11.2021.

49. Полимерные композитные материалы ООО «ТехЭкра». URL: <http://nwttc.ru/proekty/ekraniruyuwie-materialy/> (дата обращения: 18.01.2024).

50. РТ-технологии. URL: <https://www.rttex.ru/> (дата обращения: 18.01.2024).

51. ФИПС. Программы для ЭВМ. Базы данных. ТИМС URL: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=120548AC-8096-4D04-B18D-9175649C2440> (дата обращения: 19.08.2024).

Информация об авторе

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры телевидения и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – электромагнитная совместимость; экранирование; измерительные системы; численные методы.

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

E-mail: maxmek@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>

References

1. Paul C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2nd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 989 p.

2. Celozzi S., Araneo R., Burghignoli P., Lovat G. Electromagnetic Shielding: Theory and Applications. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2023, 563 p.

3. Knyazev A. D., Kechiev L. N., Petrov B. V. *Konstruirovaniye radioelektronii i elektronno-vichislitelnoi apparatyri s ychetom electro-magnnitnoi sovmestimosti* [Design of Radio-Electronic and Electronic-Computing Equipment with Consideration of Electromagnetic Compatibility]. Moscow, Radio i svyaz, 1989, 229 p. (In Russ.)

4. Schelkunoff S. A. Electromagnetic Waves. New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943, 543 p.

5. Teshe F. M., Ianoz M. V., Karlsson T. EMC Analysis Methods and Computational Models. New Jersey, John Wiley & Sons, 1997, 623 p.

6. Mendez H. A. Shielding Theory of Enclosures with Apertures. IEEE Trans. on Electromagnetic Com-

patibility. 1978, vol. EMC-20, no. 2, pp. 296–305. doi: 10.1109/TEM.1978.303722

7. Bui V. P., Thitsartarn W., Liu E.-X., Chuan J. Y. C., Chua E.-K. EM Performance of Conductive Composite Laminate Made of Nanostructured Materials for Aerospace Application. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2015, vol. 57, no. 5, pp. 1139–1148. doi: 10.1109/temc.2015.2432831

8. Balan I., Morari C., Patroi E. Composite Materials for Electromagnetic Shielding. U.P.B. Sci. Bull., Series B. 2016, vol. 78, no. 2, pp. 233–238.

9. Sevgi L. Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2009, vol. 51, no. 1, pp. 211–216. doi: 10.1109/map.2009.4939074

10. Zheng Pan, Yue-bo Li, Jian Zhao, Sheng Jia, Zheng-yu Huang. Shielding Effectiveness of Shields and Their Combined Double-Layer Shields for Low Frequency Pulsed Magnetic Field. Proc. of IEEE Intern.

Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов

35

с использованием двоянных и коаксиальных ТЕМ-камер

Models and Methods for Calculating and Measuring the Shielding Effectiveness of Materials Using Dual and Coaxial TEM Cell

Conf. on Computational Electromagnetics (ICCEM). Shanghai, China, 20–22 March 2019. IEEE, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/compem.2019.8779048

11. Shapiro D. N. *Osnovi teorii elektromagnitnogo ekranirovaniya* [Fundamentals of Elec-Tromagnetic Shielding Theory]. Leningrad, *Energiya*, 1975, p. 109. (In Russ.)

12. ECSS-E-HB-20-07A. Space Engineering – Space Systems Electromagnetic Compatibility Handbook. Available at: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-20-07a-electromagnetic-compatibility-handbook-5-september-2012/> (accessed: 19.08.2024).

13. ECSS-E-ST-20-07C. Space Engineering – Electromagnetic Compatibility. Available at: <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-07c-rev-2-electromagnetic-compatibility-3-january-2022/> (accessed: 19.08.2024).

14. Ansys HFSS. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-hfss> (accessed: 19.08.2024).

15. Ott H. W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 1988, 448 p.

16. McDowell A., Hubing T. Analysis and Comparison of Plane Wave Shielding Effectiveness Decompositions. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2014, vol. 56, no. 6, pp. 1711–1714. doi: 10.1109/temc.2014.2332133

17. Ondrejka A. R., Adams J. W. Shielding Effectiveness (SE) Measurement Techniques. Nat. Symp. on Electromagn. Compat., San Antonio, TX, USA, 24–26 Apr. 1984. IEEE, 1984, pp. 249–256. doi: 10.1109/ISEMC.1984.7571012

18. Stanescu C., Chita M. A. Some Aspects Regarding the Experimental Methods for Determining the Shielding Effectiveness of Materials in the Microwave Range. Intern. Conf. on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE-2014), Baku, Azerbaijan, 7–8 Sept. 2014, pp. 275–278. doi: 10.13140/rg.2.1.4371.5601

19. IEEE Std 299–2006. Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4117954> (accessed: 19.08.2024).

20. MIL-STD-285. Method of Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes. Available at: <https://www.hftechnology.nl/wp-content/uploads/MIL-STD-285.pdf> (accessed: 19.08.2024).

21. IEEE Std 299.1–2013. Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having All Dimensions Between 0.1 m and 2 m. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712029> (accessed: 19.08.2024).

22. ASTM D4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. Available at: <https://www.astm.org/d4935-18.html> (accessed: 19.08.2024).

23. Badic M., Marinescu M.-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H. F. Range. Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Minneapolis, MN, USA, 19–23 Aug. 2002.

IEEE, 2002, pp. 29–34. doi: 10.1109/ISEMC.2002.1032442

24. Liu Y., Wei W., Xiang C., Xin N., Mo Z., Rui J., Jinxi L. A Test Method for Shielding Effectiveness of Materials against Electromagnetic Pulse Based on Coaxial Flange. Energies. 2023, vol. 16, no. 18, pp. 6701. doi: 10.3390/en16186701

25. Wilson P. F., Ma M. T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. Natl. Bur. Stand. Tech. Note 1095, USA, 1986, 72 p.

26. Wilson P. F., Ma M. T., Adams J. W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part I: Far-Field Source Simulation. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988, vol. 30, no. 3, pp. 239–250. doi: 10.1109/15.3302

27. Valente R., De Ruijter C., Vlasveld D., Van Der Zwaag S., Groen P. Setup for EMI Shielding Effectiveness Tests of Electrically Conductive Polymer Composites at Frequencies up to 3.0 GHz. IEEE Access. 2017, vol. 5, pp. 16665–16675. doi: 10.1109/access.2017.2741527

28. Tourounoglou E., Gkatsi V., Roc'h A., Vogt-Ardatjew R., Schipper H., Leferink F. Influence of Planar Material Size and Position on Shielding Effectiveness Measurements Using the Dual Waveguide Method. Proc. of IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. Barcelona, Spain, 2–6 Sept. 2019. IEEE, 2019, pp. 707–711. doi: 10.1109/emceurope.2019.8871968

29. Rudd M., Baum T.C., Ghorbani K. Determining High-Frequency Conductivity Based on Shielding Effectiveness Measurement Using Rectangular Waveguides. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. 2019, vol. 69, no. 1, pp. 155–162. doi: 10.1109/tim.2019.2895930

30. Wilson P. F., Ma M. T. Small Aperture Analysis of the Dual TEM Cell and an Investigation of Test Object Scattering in a Single TEM Cell. National Bureau of Standards, Tech. Note 1076, USA, 1984. 57 p.

31. Crawford M. L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cell. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1974, vol. 16, no. 4, pp. 189–195. doi: 10.1109/temc.1974.303364

32. Wilson P. F., Ma M. T. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part II: Near-Field Source Simulation. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988, vol. 30, no. 3, pp. 251–259. doi: 10.1109/15.3303

33. Wilson P. F. A Comparison between Near-Field Shielding-Effectiveness Measurements Based on Coaxial Dipoles and Electrically Small Apertures. IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988, vol. 30, no. 1, pp. 23–28. doi: 10.1109/15.19884

34. Voicu V., Pătru I., Nicolae P. M., Dina L. A. Analyzing the Attenuation of Electromagnetic Shielding Materials for Frequencies Under 1 GHz. Proc. of Int. Symp. on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). Bucharest, Romania, 23–25 March 2017. IEEE, 2017, pp. 336–340. doi: 10.1109/atee.2017.7905057

35. Higgins D. F., Wheeler R., Wenaas E. A Comparison of Theoretical Expressions and Experimental Data for EM Penetration Through Small Apertures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1985, vol. 32, no. 6, pp. 4340–4345. doi: 10.1109/tns.1985.4334120
36. Casey K. F. Low-Frequency Electromagnetic Penetration of Loaded Apertures. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1981, vol. 23, iss. 4, pp. 367–377. doi: 10.1109/aps.1992.221738
37. Avloni J., Ouyang M., Florio L., Henn A. R., Sparavigna A. Shielding Effectiveness Evaluation of Metalized and Polypyrrole-Coated Fabrics. *J. of Thermoplastic Composite Materials*. 2007, vol. 20, iss. 3, pp. 241–254. doi: 10.1177/089270570707076718
38. Wilson P. F., Ma M. T. Shielding-Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1985, vol. 27, iss. 3, pp. 137–142. doi: 10.1109/temc.1985.304277
39. McDonald N. A. Electric and Magnetic Coupling through Small Apertures in Shield Walls of Any Thickness. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1972, vol. 20, iss. 10, pp. 689–695. doi: 10.1109/tmtt.1972.1127844
40. Manara A. Measurement of Material Shielding Effectiveness Using a Dual TEM Cell and Vector Network Analyzer. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1996, vol. 38, no. 3, pp. 327–333. doi: 10.1109/15.536062
41. Collin R. E. *Field Theory of Guided Waves*. 2nd ed. New Jersey, Wiley-IEEE Press, 1990, 864 p.
42. Bethe H. A. Theory of Diffraction by Small Holes. *Physical Review*. 1944, vol. 66, no. 7, pp. 163–182. doi: 10.1103/physrev.66.163
43. Shi D., Gao Y., Shen Y. Determination of Shielding Effectiveness of Multilayer Shield by Making Use of Transmission Line Theory. *Proc. of Int. Symp. on Electromagn. Compat. and Electromagnetic Ecology*. Russia, Saint Petersburg, 26–29 June 2007. IEEE, 2007, pp. 1–3. doi: 10.1109/emceco.2007.4371656
44. Schulz R. B., Plantz V. C., Brush D. R. Shielding Theory and Practice. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1988, vol. 30, no. 3, pp. 187–201. doi: 10.1109/15.3297
45. Ivanov A. A., Kvasnikov A. A., Onishchenko I. A., Demakov A. V., Kuksenko S. P. Analytical Model and Software for Evaluating the Shielding Materials Properties. *IEEE 22nd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Souzga, Russia, 30 June–4 July 2021. IEEE, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/edm52169.2021.9507593
46. Komnatnov M. E., Gazizov T. R., Matveyenko O. A. The TEM Cell for Assessment of Radioelectronic Equipment of Emission and Immunity with the Possibility of Studying Biologic Objects in the Frequency Range up to 2 GHz. *Technologii elektromagnitnoi sovmestimosti* [Electromagnetic Compatibility Technologies]. 2018, no. 4 (67), pp. 46–56. (In Russ.)
47. Komnatnov M. E., Gazizov T. R. TEM Cell. *Pat.RU 2606173*. Publ. 10.01.2017 (In Russ.)
48. Demakov A. V., Komnatnov M. E., Ivanov A. A., Nikolaev I. I., Gazizov T. R. Coaxial Chamber for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Radio Absorbing Materials. *Pat RU 2759079*. Publ. 09.11.2021 (In Russ.)
49. NWTTC is a part nanotechnology industry network. Available at: <http://nwttc.ru/proekty/ekraniruyuwie-materialy/> (accessed: 18.01.2024).
50. RT-Technology. Available at: <https://www.rttex.ru/> (accessed: 18.01.2024).
51. FIPS. Computer Programs, Databases, TIC. Available at: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?lang=en&type=doc&tab=PrEVM&id=120548AC-8096-4D04-B18D-9175649C2440> (accessed: 19.08.2024).

Information about the author

Maxim E. Komnatnov, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Television and Management of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: electromagnetic compatibility; shielding; measuring systems; numerical methods. Address: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia E-mail: maxmek@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6463-2889>

Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот

Д. Д. Дмитриев¹, А. Б. Гладышев¹, О. Б. Грицан²✉

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²ООО «НПЦ "Малые космические аппараты"», Железногорск, Россия

✉ gritsan@npc-mka.ru

Аннотация

Введение. В связи с исчерпанием частотного ресурса в Ku-диапазоне частот активно разрабатываются спутниковые системы связи в более высокочастотных диапазонах Ka и Q. Для земных станций спутниковой связи этих диапазонов характерна работа на прием и передачу на сильно разнесенных частотах (в 1.5 и более раз). Зеркальные антенны, применяемые в станциях связи, должны обеспечивать формирование диаграмм направленности (ДН) с необходимыми параметрами в двух разнесенных диапазонах. Поэтому при разработке облучателей таких антенн существует ряд неразрешенных на сегодняшний день трудностей, обусловленных высокими требованиями к их техническим характеристикам.

Цель работы. Разработка моделей и макетирование двухдиапазонного облучателя на основе коаксиальной схемы и фидерного тракта с использованием узкополосного перехода с прямоугольного волновода на круглый.

Материалы и методы. Расчет и исследование разработанной конструкции двухдиапазонной облучающей системы проводились с применением программного обеспечения CST Studio Suite и специально разработанных программ-дополнений, которые существенно упрощают и ускоряют работу.

Результаты. Разработан макет двухдиапазонного облучателя ЭИФ5.468587.001, обеспечивающий формирование ДН зеркальной антенны в диапазоне частот приема (19.172...19.792 ГГц) с коэффициентом направленного действия (КНД) не менее 46 дБи и уровнем первого бокового лепестка не более 20.1 дБ; в диапазоне частот передачи (43.924...44.524 ГГц) с КНД не менее 52.7 дБи и уровнем первого бокового лепестка не более 16.7 дБи. Проведен сравнительный анализ разработанного макета облучающей системы с серийным образцом облучателя в составе антенны 08150.6220-0 земной станции спутниковой связи.

Заключение. Изготовленный облучатель ЭИФ5.468587.001 позволяет формировать осесимметричную ДН зеркальной антенны с более высоким КНД (на 0.7 дБи в режиме приема и на 1.4 дБи в режиме передачи) и с более низким уровнем внеосевых излучений по сравнению с серийным облучателем, изготовленным АО "РЕШЕТНЕВ" в составе антенны 08150.6220-0 и используемым в настоящее время в составе земной станции спутниковой связи.

Ключевые слова: двухдиапазонный облучатель; облучатель Ka/Q-диапазонов; двухзеркальная антенна, станция спутниковой связи

Для цитирования: Дмитриев Д. Д., Гладышев А. Б., Грицан О. Б. Двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 38–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-38-51

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 13.11.2023; принята к публикации после рецензирования 12.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station

Dmitry D. Dmitriev¹, Andrey B. Gladyshev¹, Oleg B. Gritsan^{2✉}

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²LLC «RPC "Small Spacecraft"», Zheleznogorsk, Russia

✉ gritsan@npc-mka.ru

Abstract

Introduction. Due to the depletion of the frequency resource in the Ku frequency range, satellite communication systems are being actively developed in higher frequency ranges, i.e., Ka and Q. Satellite communication earth stations in these ranges are characterized by receiving and transmitting at widely spaced frequencies (1.5 times or greater). Mirror antennas used in communication stations must ensure the formation of appropriate radiation patterns in two separated ranges. Therefore, due to the high requirements for their technical characteristics, the development of feeds for such antennas is associated with a number of currently unresolved difficulties.

Aim. Development of models and prototyping of a dual-band feed based on a coaxial circuit and a feeder path using a narrow-band transition from a rectangular waveguide to a round one.

Materials and methods. Calculation and research of the developed design of a dual-band irradiation system was carried out using the CST Studio Suite software and specially developed add-on programs that significantly simplify and speed up the work.

Results. A prototype of the dual-band feed EIF5.468587.001 was developed, which ensures the formation of the radiation pattern of a mirror antenna in the receiving range (19.172...19.792 GHz) with an efficiency of no less than 46 dBi and the level of the first side lobe of no more than 20.1 dB, and in the transmitting range (43.924...44.524 GHz) with an efficiency of no less than 52.7 dBi and a first side lobe level of no more than 16.7 dBi. A comparative analysis of the developed feed model with a serial sample as part of the 08150.6220-0 antenna of a satellite communications earth station was carried out.

Conclusion. The EIF5.468587.001 feed produced as a result of the work makes it possible to form an axisymmetric pattern of a mirror antenna with a higher efficiency (by 0.7 dBi in the receiving mode and 1.4 dBi in the transmitting mode) and with the lowest level of off-axis radiation compared to the feed manufactured by JSC ISS as part of the 08150.6220-0 antenna and currently used as part of a satellite communication station.

Keywords: dual-band feed, Ka/Q-band feed, dual-mirror antenna, satellite communication station

For citation: Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Gritsan O. B. Dual-Band Irradiation System of Ka/Q Band for Satellite Communication Station. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 38–51. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-38-51

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

Submitted 13.11.2023; accepted 12.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. В последние годы бурно развиваются космические системы связи и широкополосного доступа к сети Интернет. Кроме того, в условиях современной геополитической обстановки создание отечественной системы спутниковой связи приобретает самый актуальный характер. В настоящее время корпорация "Роскосмос" активно приступила к запуску первых спутников связи и широкополосного доступа к сети Интернет, реализуя спутниковую группировку для проекта "Сфера". Цель двухдиапазонный облучатель зеркальной антенны для станции спутниковой связи Ka/Q-диапазонов частот

указанного проекта – создание комплексной услуги подвижной связи, интернета и мониторинга на базе отечественных космических информационных технологий в интересах цифровой трансформации экономики для обеспечения суверенитета, связанности и пространственного развития территорий РФ [1].

Для перспективных систем спутниковой связи АО "РЕШЕТНЕВ" разработана земная станция спутниковой связи (ЗССС) [2], обеспечивающая излучение и прием сигналов в Ka/Q-



Рис. 1. Внешний вид зеркальной антенны 08150.6220-0, разработанной АО ИСС для ЗССС Ka/Q-диапазонов

Fig. 1. Appearance of the 08150.6220-0 mirror antenna developed by ISS JSC for the Ka/Q band communication station

диапазонах частот (диапазон частот приема – 19.172...19.792 ГГц, диапазон частот передачи – 43.924...44.524 ГГц) [3]. В качестве антенной системы в ЗССС используется специально разработанная АО "РЕШЕТНЕВ" антенна с двухдиапазонной облучающей системой 08150.6220-0. Антенна представляет собой двухзеркальную конструкцию схемы Кассегрена с параболическим рефлектором диаметром 1.2 м и контррефлектором, имеющим специальный профиль центрального сечения отражающей поверхности (рис. 1) [4]. Экспериментальные исследования показали, что при использовании указанной антенны в прямом канале ЗССС энергетики радиолинии достаточно для использования сигнала с шириной спектра 12 МГц при организации связи с космическим аппаратом "Благовест". Обратный канал связи имеет дефицит энергетики в 1.2 дБ. Одной из причин недостаточного значения мощности сигнала на входе приемного канала является несовершенная конструкция антенны.

Устранить дефицит энергетики радиолинии в обратном канале за счет изменения параметров бортового ретрансляционного комплекса (мощности и коэффициента усиления (КУ) антенны) при наличии введенной в эксплуатацию группировки невозможно, поэтому требуется менять конструкцию приемной антенны ЗССС.

Для режима приема основной характеристикой ЗССС является ее добротность:

$$Q = G_{\text{пр}} / T_{\text{ш}},$$

где $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления антенны ЗССС на прием; $T_{\text{ш}}$ – шумовая температура входной части канала приема.

Именно этот параметр определяет отношение сигнал/шум на входе приемного канала ЗССС. Поэтому для стабильного функционирования обратного канала связи необходимо применять антенну с большим коэффициентом усиления, чем у используемой на данный момент. Кроме того, использование двухзеркальной антенны вносит в ее характеристики недостаток в виде повышенного уровня боковых лепестков, который для используемой антенны 08150.6220-0 имеет значение –10.9 дБ, что является пороговым уровнем по требованиям Международного консультативного комитета по радио.

В настоящей статье представлена новая двухдиапазонная облучающая система, которая в составе антенной системы ЗССС позволит получить требуемые энергетические характеристики обратного канала радиолинии и низкий уровень боковых лепестков.

Выбор схемы построения двухдиапазонной облучающей системы. Проектируемая антенна ЗССС строится по схеме с обратным излучением, т. е. поток электромагнитной энергии облучателя направляется на контррефлектор, который переотражает излучение на основной рефлектор.

Двухдиапазонный облучатель Ka/Q-диапазонов вместе с контррефлектором должен обеспечивать близкое к равномерному амплитудное и синфазное фазовое распределения в раскрыве основного рефлектора в диапазонах частот:

- приема (RX): 19.172...19.792 ГГц;
- передачи (TX): 43.924...44.524 ГГц.

Относительная ширина полос рабочих частот приема и передачи составляет 3.18 и 1.36 % соответственно, а соотношение центральных частот передачи и приема – 2.25.

Облучатель можно условно разделить на две части – собственно излучающую часть и фидерный тракт, в котором формируются волны требуемых поляризаций, осуществляется согласование, а в некоторых случаях – частотная и поляризационная селекция. Выбор способа реализации этих частей осуществляется исходя из выбранной схемы построения облучателя.

Существуют две основные схемы построения двухдиапазонных облучателей – с совмещением излучающих раскрывов двух диапазонов (совмещенная) и с коаксиальным располо-

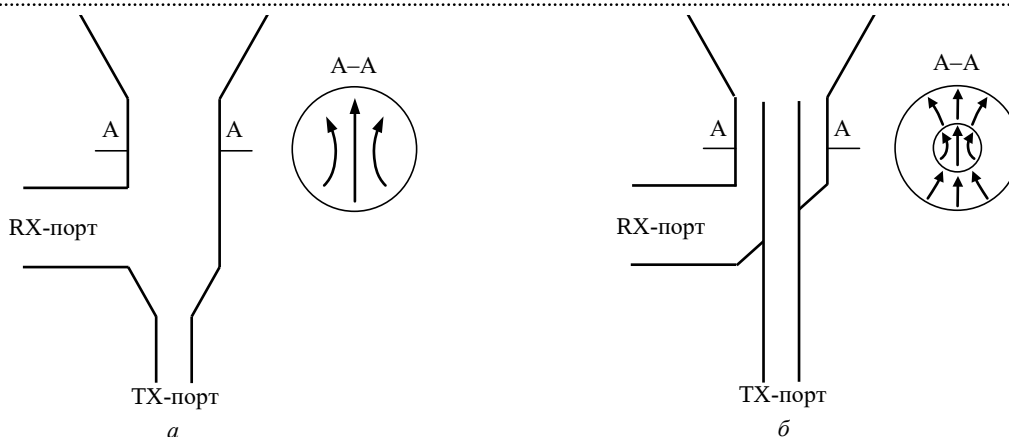


Рис. 2. Схемы построения двухдиапазонных облучателей: а – совмещенная; б – коаксиальная

Fig. 2. Schemes for dual band irradiators constructing: а – combined; б – coaxial

жением излучающих раскрывов (коаксиальная) [5–8] (рис. 2).

Совмещенная схема (рис. 2, а) предполагает распространение волн ТХ- и RX-диапазонов в одном круглом волноводе и излучение их одним рупором. Рабочей модой (типом волны) круглого волновода является волна типа Н11 (распределение электрического поля показано на рис. 2, а). При этом в случае большого разнеса частот приема и передачи, в круглом волноводе для более высокочастотной ТХ-волны может создаваться многомодовый режим распространения, если в тракте присутствуют неоднородности, на которых полем рабочей моды могут возбуждаться высшие моды. Поля высших мод при излучении могут искажать амплитудные и фазовые диаграммы направленности (ДН) облучателя, поэтому их возбуждение нежелательно. Из набора высших мод круглого волновода модой Н11 наиболее сильно возбуждается мода Е11, имеющая структуру поля, близкую к структуре поля моды Н11. Соотношение частот отсечки мод Е11 и Н11 в круглом волноводе составляет 2.09, поэтому при соотношении частот передачи и приема более 1.5...2 (с учетом того, что рабочие частоты лежат выше частоты отсечки волны Н11) применение совмещенной схемы затруднительно из-за возможности возбуждения моды Е11.

В коаксиальной схеме (рис. 2, б) фидерные тракты и излучающие раскрывы для RX и ТХ отдельные, но расположены соосно. При этом передача мощности для ТХ-части происходит по круглому волноводу, который одновременно является центральным проводником коакси-

альной линии, по которой распространяется RX-волна. И в RX-, и в ТХ-волноводах рабочей модой является Н11 (распределение электрических полей показано на рис. 2, б). Волна ТХ-диапазона в коаксиальной схеме излучается открытым концом круглого волновода или диэлектрической антенной, установленной на конце круглого волновода, а волна RX-диапазона излучается рупорной антенной.

Коаксиальная схема позволяет избежать многомодового режима распространения в ТХ-диапазоне при большом разнесе частот RX- и ТХ-диапазонов, так как каждая линия (коаксиальная на RX и круглый волновод на ТХ) работает в одномодовом режиме. Однако применима такая схема только при достаточно большом разнесе частот приема и передачи (соотношение частот передачи и приема составляет 1.5 и более). В противном случае не удастся обеспечить одномодовый режим распространения в коаксиальном низкочастотном тракте. Следует при этом заметить, что для коаксиальной линии основным типом волны является не Н11, а ТЕМ. Тем не менее, из-за различной структуры поля при распространении волны Н11 существенного возбуждения волны ТЕМ не происходит, поэтому режим распространения волны Н11 в коаксиальном волноводе будет одномодовым.

Таким образом, для двухдиапазонных облучателей с соотношением частот передачи и приема менее 1.5...2 применима совмещенная схема, а при соотношении более 1.5 – коаксиальная схема. Отсюда следует, что для облучателя Ka/Q-диапазонов должна применяться коаксиальная схема.

Выбор облучающей части двухдиапазонной облучающей системы. ДН облучателя и форма контррефлектора должны быть подобраны так, чтобы обеспечивать максимальный коэффициент использования поверхности (КИП) основного рефлектора и равномерное распределение поля на нем. Зеркальная антенна, применяемая в ЗССС, имеет диаметр $d = 1200$ мм и фокусное расстояние $F = 420$ мм ($F/d = 0.35$) и является короткофокусной. Для получения максимального КИП такой антенны требуется облучающая система (облучатель и контррефлектор) с осесимметричной ДН с шириной по уровню -10 дБ, равной 120° .

Геометрия гиперболического контррефлектора в антенне Кассегрена задается расстоянием между двумя его фокусами и эксцентриситетом. Один из фокусов контррефлектора должен совпадать с фокусом основного зеркала, другой фокус – с фазовым центром облучателя. Расстояние между фокусами контррефлектора должно быть достаточно большим для того, чтобы контррефлектор находился в дальней зоне облучателя. Диаметр контррефлектора обычно составляет около 10 % диаметра основного зеркала, что является компромиссом между достаточно большим электрическим размером и минимизацией затенения раскрыва. Ширина ДН облучателя выбирается исходя из условия облучения края контррефлектора по уровню $-15...-20$ дБ от облучения центра контррефлектора.

Исходя из перечисленных условий было рассчитано, что облучатель должен иметь в обоих рабочих диапазонах амплитудную ДН осесимметричной формы с шириной по уровню -15 дБ, равной 80° . Требования к фазовым ДН облучателя сводятся к тому, чтобы у него существовал близкий к точечному фазовый центр, причем положения фазовых центров в обоих рабочих диапазонах совпадали.

Рупор, используемый в коаксиальной схеме для излучения волн РХ-диапазона, может быть выполнен плоским или гофрированным. Гофрированный рупор обладает, по сравнению с плоским, лучшим уровнем кроссполяризации и более осесимметричной ДН, так как в нем распределение полей рабочей волны Н₁₁ искажается таким образом, что амплитудное распределение в раскрыве рупора становится более

осесимметричным, а кроссполяризационные компоненты поля уменьшаются [9]. Это объясняется модификацией за счет гофрирования поверхностного импеданса стенок рупора в диапазоне частот, для которого глубина канавок гофра близка к $\lambda/4$. Гофрированные рупоры также имеют более точечный и стабильный по частоте фазовый центр. В связи с этим для проектируемого облучателя использован гофрированный рупор. Площадь раскрыва рупора должна быть подобрана так, чтобы получить необходимую ширину ДН.

Для ТХ-диапазона в коаксиальной схеме обычно применяется антенна в виде открытого конца круглого волновода. При необходимости сужения ДН в коаксиальную схему встраивают диэлектрическую антенну, возбуждаемую открытым концом круглого волновода. Для получения ширины ДН 80° по уровню -15 дБ применение диэлектрической антенны необходимо. Диэлектрическая антенна согласуется с круглым волноводом клиновидным переходом от полого волновода к волноводу с диэлектрическим заполнением, а затем к диэлектрической антенне [10].

На рис. 3 показан общий вид спроектированного коаксиального излучателя. Рупор вы-

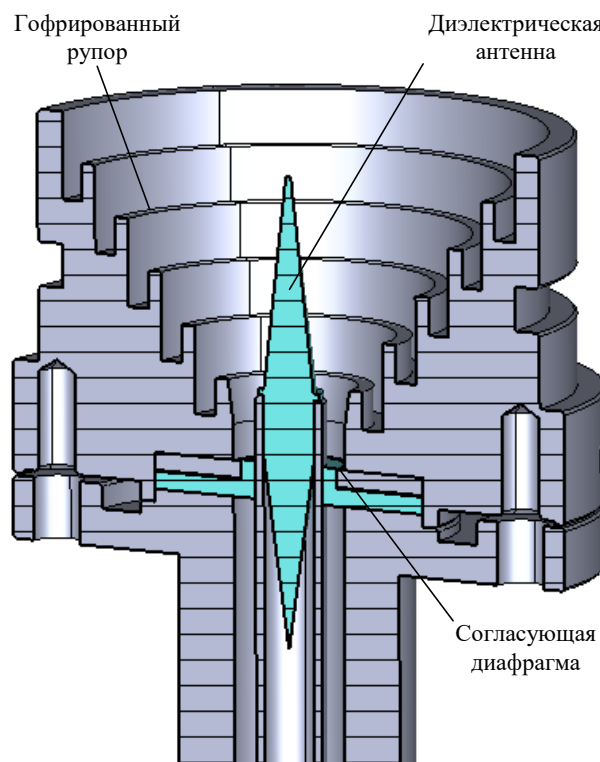


Рис. 3. Излучающая часть коаксиального облучателя Ка/Q-диапазонов (показана в разрезе)

Fig. 3. Radiating part of the Ka/Q band coaxial feed (shown in section)

полнен с продольным гофрированием, что упрощает производство. Глубина канавок на рабочей частоте RX-диапазона равна $\lambda/4$. Диэлектрическая антенна ТХ-диапазона выполнена из фторопласта.

При переходе от коаксиальной линии к рупорному излучателю в месте их сочленения возникает скачок волнового сопротивления, поэтому согласование коаксиального волновода с гофрированным рупором осуществляется в узкой полосе частот с помощью кольцевой металлической диафрагмы и паза, расположенных на расстоянии около четверти длины волны от перехода волновод–рупор (рис. 3). Для центровки диафрагма и паз дополнены фторопластовой втулкой специальной формы [11].

Выбор конструкции фидерного тракта. Облучающая система должна обеспечивать работу в диапазонах приема и передачи на круговых ортогональных поляризациях (правой или левой). Работа одновременно на двух поляризациях в каждом диапазоне не требуется, поэтому в фидерном тракте не применяются ортомоды (устройства для разделения поляризаций). Фидерные тракты состоят только из переходников с прямоугольных волноводов стандартных сечений на соответствующую линию (коаксиальную или круглый волновод) и поляризаторов. Устройства частотной селекции (фильтры), обеспечивающие необходимую развязку трактов приема и передачи, проектиру-

ются отдельно от облучателя. Как указывалось ранее, относительная ширина полос приема и передачи облучателя не превышает 3.2 %. Следовательно, переходы с прямоугольного волновода могут выполняться узкополосными (с шириной полосы рабочих частот менее 5 %).

Поляризатор формирует из волны линейной поляризации волну с круговой поляризацией (или наоборот). Принцип работы поляризатора заключается во внесении разности фаз 90° между двумя синфазными ортогональными компонентами, которыми может быть представлена линейно-поляризованная волна на входе в поляризатор. Известно несколько видов поляризаторов, которые могут применяться в круглом или коаксиальном (с рабочей модой Н11) волноводе. Это поляризаторы в виде диэлектрических пластин, металлических ребер, пазов, расположенных под углом 45° к направлению поляризации волны на входе поляризатора [12]. Поляризаторы в облучателе Ka/Q-диапазонов, как и переходы, могут выполняться узкополосными, так как тракты приема и передачи в коаксиальной схеме облучателя отдельные.

Конструкция фидерного тракта. Узкополосный переход с прямоугольного волновода на круглый может быть выполнен ступенчатым – между прямоугольной и круглой секциями помещаются 2 отрезка определенной длины со специально подобранными сечениями (рис. 4, а). Переход с прямоугольного волновода на коак-

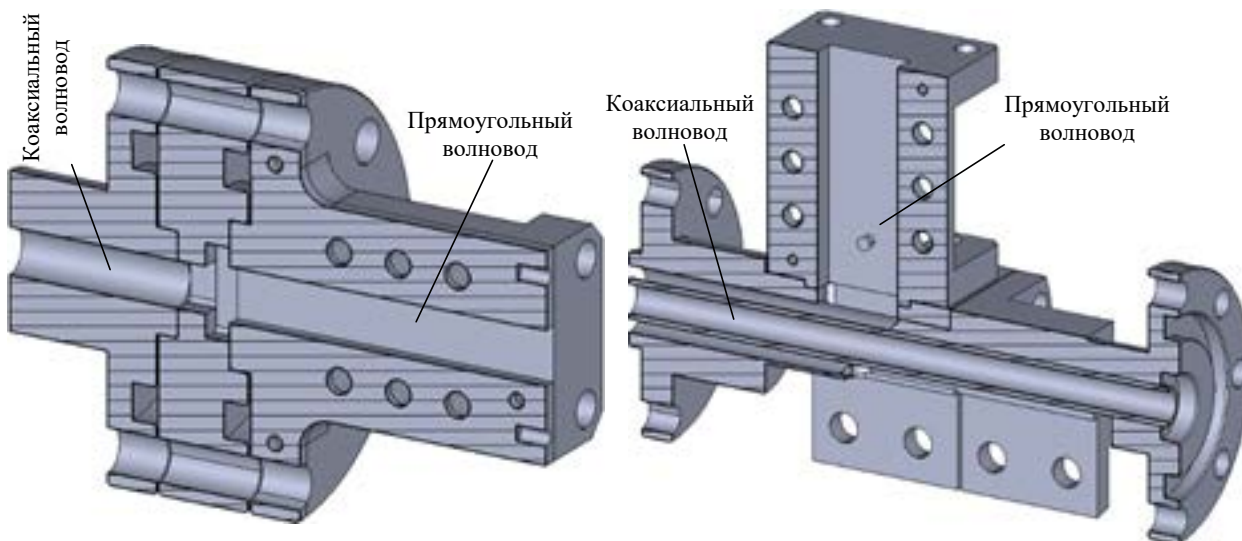


Рис. 4. Переходы: а – с прямоугольного волновода на круглый; б – с прямоугольного волновода на коаксиальный (показаны в разрезе)

Fig. 4. Transitions: а – from a rectangular waveguide to a round one; б – from a rectangular waveguide to a coaxial one (shown in section)

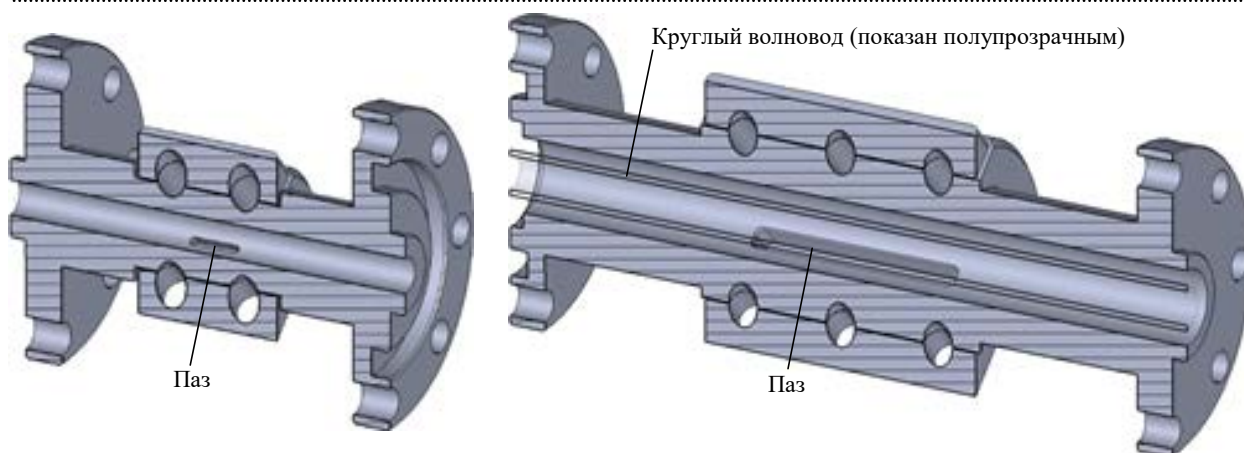


Рис. 5. Поляризаторы на пазах: а – в круглом волноводе; б – в коаксиальном волноводе (показаны в разрезе, виден один из пазов поляризатора)

Fig. 5. Polarizers on slots: а – in a round waveguide; б – in a coaxial waveguide (shown in section, one of the polarizer slots is visible)

сиальный с возбуждением моды Н11 выполняется в виде Г-образного сочленения (рис. 4, б). Из-за разницы волновых сопротивлений в таком соединении необходима согласующая емкостная диафрагма в прямоугольном волноводе на расстоянии около четверти длины волны от места сочленения, которая может быть выполнена в виде подстроечного винта. В узкой полосе такие переходы обеспечивают при должной настройке уровень отражений не более –30 дБ.

В представленной в настоящей статье конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов применены поляризаторы на основе пазов (рис. 5), так как в верхней части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн они наиболее технологичны в производстве и одновременно обладают хорошими характеристиками. Такие поляризаторы одинаково хорошо работают как в круглом, так и в коаксиальном волноводах (с волной Н11) и позволяют получить коэффициент отражения не хуже –30 дБ и коэффициент эллиптичности не хуже 0.9 в полосе частот 5 %.

При диаметре параболического рефлектора 1.2 м длина фидерного тракта от порта ТХ до фазового центра облучателя (внутреннего волновода) составляет примерно 0.5 м.

В облучателе, выполненном по коаксиальной схеме, необходимо поддерживать соосность внутреннего волновода коаксиала с внешней трубой по всей длине. При указанной длине внутреннего волновода для этого предложено применить фторопластовые втулки. Однако наличие втулки в волноводном тракте

повышает коэффициент отражения от входа тракта. В ходе исследований установлено, что негативное влияние фторопластовых втулок на коэффициент отражения в рабочей полосе частот можно устранить, если выполнить втулки определенной длины и разместить их на соответствующем расстоянии друг от друга. В этом случае втулки и пространство между ними действуют как резонаторы, настроенные на заданную частоту, и их расположение можно настроить таким образом, чтобы сформировать характеристику передачи, подобную характеристике полосно-пропускающего фильтра. На рис. 6 показан отрезок коаксиальной линии со втулками, расположенный между фидерной и излучающей частями облучателя.

В результате экспериментов с макетами облучателей установлено, что для поддержания соосности коаксиальной линии достаточно одной втулки, располагающейся в центральной части облучателя. Поэтому в итоговой версии облучателя оставлена одна втулка, расположе-

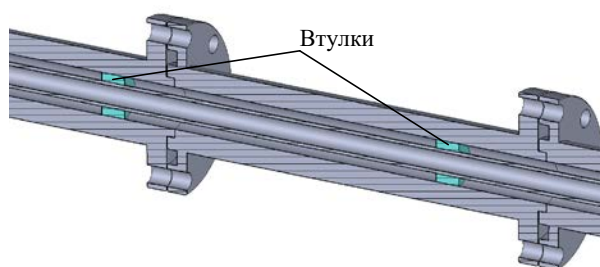


Рис. 6. Отрезок коаксиальной линии с центрирующими втулками (показан в разрезе)

Fig. 6. A section of a coaxial line with centering bushings (shown in section)

ние которой выбрано также с учетом формирования необходимой характеристики передачи.

Конструкция двухдиапазонной облучающей системы. В соответствии с приведенным описанием для реализации двухдиапазонного облучателя Ka/Q-диапазонов выбрана коаксиальная схема с гофрированным рупором и поляризаторами на основе пазов. В конструкции также предусмотрены возможность крепления контррефлектора, узел крепления облучателей к основному рефлектору и герметизация фланцевых соединений [13].

Разработанная конструкция облучателя Ka/Q-диапазонов представлена на рис. 7 [14]. Материал диэлектрических центрирующих втулок, диэлектрической антенны и диэлектрической шайбы согласующего узла – фторопласт. Основной материал облучателя – алюминий марки Д16 с покрытием Хим. Н12. М6. Ср6 (серебряное толщиной 6 мкм, с подслоем меди 6 мкм и никеля 12 мкм).

Методы исследования. Исследование разработанной конструкции двухдиапазонной облучающей системы проводилось с применением программного обеспечения CST Studio Suite и специально разработанных программ-дополнений, которые существенно упрощают и ускоряют работу. При моделировании исполь-

зованы классические методы анализа электродинамических структур на основе полного набора уравнений Максвелла.

Одной из основных проблем при разработке антенн и элементов фидерного и СВЧ-тракта является выбор методов расчета и подбор решающей программы. В программе CST Studio Suite, вычислительное ядро которой использовалось при моделировании, содержится целый ряд вычислителей. В моделировании облучателя, выполнявшемся при проектировании описанной антенны, использовались вычислитель во временной области, вычислитель в частотной области и асимптотический вычислитель.

Вычислитель во временной области основан на методе конечного интегрирования (FIT), описывающем уравнения Максвелла в пространстве временных сеток, тогда как вычислитель в частотной области основан на методе конечных элементов (FEM).

Моделирование во временной области больше подходит для вычислений в широком частотном диапазоне, поскольку требуется только одна итерация моделирования. Указанный вычислитель может быть применен для моделирования во всем частотном диапазоне, от постоянного тока до высоких частот, и позволяет моделировать электрически сложные

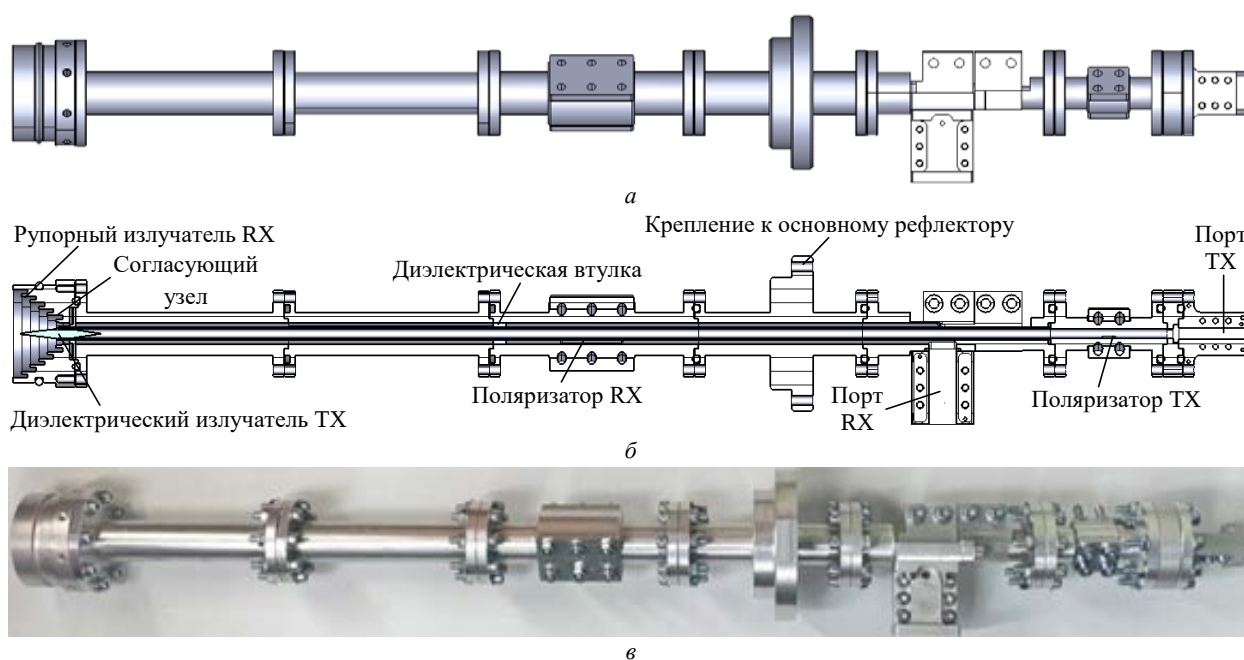


Рис. 7. Общий вид облучателя Ka/Q-диапазонов: а – модель; б – модель в разрезе; в – макет

Fig. 7. General view of the Ka/Q range irradiator: а – model, б – model cross-section; в – layout

конструкции, а расчет частотных характеристик осуществляется посредством быстрого преобразования Фурье (FFT). Поэтому указанный вычислитель больше подходит для моделирования электрически больших структур [15]. Однако при анализе сложных структур с использованием этого вычислителя для улучшения точности моделирования необходимо уменьшать шаг сетки временных отсчетов, что приводит к увеличению их количества и к росту времени расчета для этого вычислителя. Главным недостатком метода является сложность дискретизации изогнутых структур [16].

Вычислитель с использованием матрицы линий передач (Transmission Line Matrix – TLM) также выполняет анализ во временной области. Для этого в CST используется метод сетки с шестигранной матрицей линий передачи. Особенностью TLM-вычислителя является использование заранее рассчитанных специальных компактных моделей щелей, зазоров, стыков, отверстий и т. д. Достоинство данного метода – гибкость и простота математической формулировки и программной реализации. Метод более вычислительно затратен по сравнению с другими методами.

При использовании метода анализа в частотной области (FEM-вычислителя) моделирование выполняется на дискретных частотах, следующих с заданным шагом и перекрывающих рабочую полосу частот. Для снижения операционного времени может использоваться адаптивное уточнение сетки на каждой частоте. Моделирование в частотной области прекращается, когда S -параметры будут сходиться. Однократное моделирование может обеспечить в одном расчете результаты для всех портов,

поэтому вычислитель в частотной области применяется при моделировании узкополосных и электрически небольших структур. В CST этот вычислитель использует либо гексаэдральную, либо тетраэдрическую сетку [17]. Достоинством FEM-вычислителя является легкость расчета комбинированных конструкций, содержащих элементы различной размерности.

Анализ работоспособности облучателя в составе антенны проводился в приближении геометрической оптики. Анализ реализован с использованием асимптотического вычислителя, основная задача которого – определение эффективной площади рассеяния электрически крупных объектов методами геометрической теории дифракции и физической оптики. Описание антенны с помощью асимптотического вычислителя выполнялось с использованием моделей источников ближнего или дальнего поля, что значительно упрощает процесс моделирования объекта с размерами, существенно превышающими длину волны. Вычислитель применим для случаев, когда другие методы численного моделирования не способны обработать рассчитываемый объект.

Результаты исследования. Расчеты основных характеристик облучающей системы проведены с помощью программного обеспечения CST Studio Suite.

На рис. 8 представлены расчетные ДН разработанной облучающей системы в диапазонах приема (рис. 8, а) и передачи сигналов (рис. 8, б) в горизонтальной и вертикальной плоскостях, где φ – угол между плоскостью сечения ДН и плоскостью Земли. Из них следует, что облучающая система имеет амплитудную ДН осесимметричной формы с шириной по уровню -15 дБ в диапазоне приема 75° , в диапазоне передачи 62° .

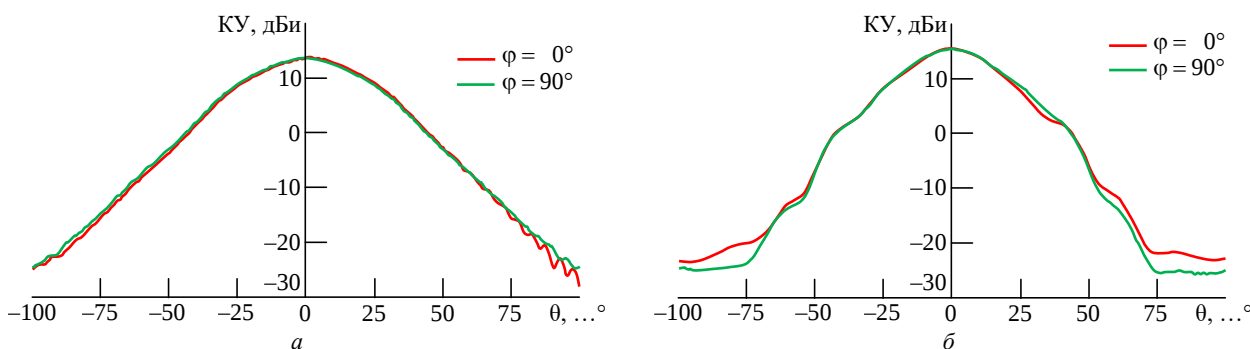


Рис. 8. ДН облучателя на центральных частотах диапазонов приема (а) и передачи (б)

Fig. 8. Feed pattern at the central frequencies of the receiving (a) and transmitting ranges (b)

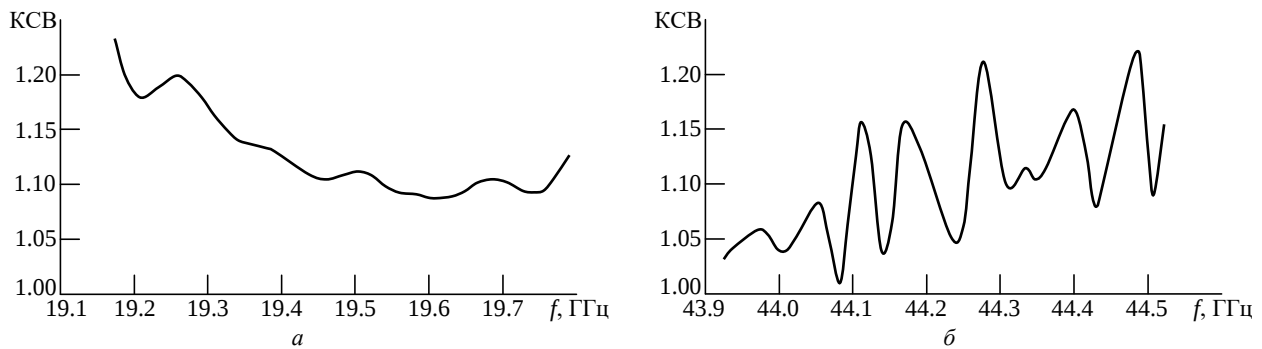


Рис. 9. KCB облучающей системы в диапазоне приема (а) и в диапазоне передачи (б)

Fig. 9. SWR of the irradiating system in the receiving range (a) and in the transmitting range (b)

На рис. 9 показаны результаты расчета коэффициента стоячей волны (КСВ) облучателя Ka/Q-диапазонов в диапазонах приема (RX) и передачи (TX). В диапазоне приема КСВ ≤ 1.24 , а в диапазоне передачи КСВ ≤ 1.23 .

Согласно расчету развязка между каналами приема и передачи в диапазоне частот приема составляет более 200 дБ, т. е. практически бесконечна, благодаря отсечке частот RX-диапазона в TX-волноводе. В диапазоне частот передачи развязка составляет около 20 дБ. Для работы ЗССС требуемое значение развязки в диапазоне частот передачи должно быть не менее 90 дБ. Одним из решений для реализации заданной развязки является применение внешнего полосно-пропускающего фильтра приемного тракта на порту RX-облучателя.

Ввиду того, что расчет характеристик направленности весьма ресурсоемок, он проводился только по пяти частотным точкам, равномерно расположенным в каждом рабочем диапазоне.

Результаты расчета кроссполяризационной развязки (КПР) и коэффициента эллиптичности (КЭ) облучателя в осевом направлении, а также КУ в составе зеркальной антенны в диапазонах приема и передачи сведены в табл. 1. КУ определен при использовании облучателя в составе двухзеркальной антенны Кассегрена с основным зеркалом диаметром $d = 1200$ мм, имеющим фокусное расстояние $d = 420$ мм. В соответствии с техническими требованиями станции спутниковой связи, для которой разрабатывалась антенна, поляризация поля излучения облучателя в диапазоне приема – левая круговая, в диапазоне передачи – правая круговая.

Табл. 1. Параметры двухдиапазонного облучателя

Tab. 1. Dual-band irradiator parameters

Диапазон	f , ГГц	Параметр		
		КПР, дБ	КЭ	КУ, дБ, антенна Кассегрена
RX	19.172	23.1	0.87	45.00
	19.327	21.8	0.85	45.31
	19.482	24.7	0.89	45.20
	19.637	26.5	0.91	45.15
	19.792	23.9	0.88	45.91
TX	43.924	26.6	0.91	51.60
	44.074	25.6	0.90	51.62
	44.224	28.9	0.93	51.70
	44.374	24.0	0.88	51.65
	44.524	27.7	0.92	51.70

Из приведенных данных следует, что в диапазоне частот приема КПР превышает 21.8 дБ, в диапазоне частот передачи развязка превышает 24 дБ. Согласно требованиям к ЗССС кроссполяризационная развязка должна в обоих диапазонах составлять не менее 19 дБ.

В диапазоне приема КЭ превышает 0.85, а КУ превышает 44.9 дБи. В диапазоне передачи КЭ превышает 0.88, КУ превышает 51.6 дБи.

Для оценки технических показателей проведено сравнение ожидаемых параметров представленной в настоящей статье конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов ЭИФ5.468587.001 (далее – облучатель ЭИФ5.468587.001) и конструкции облучателя Ka/Q-диапазонов разработки АО "РЕШЕТНЕВ" в составе антенны 08150.6220-0 (см. рис. 1).

Из-за ограничений вычислительных мощностей при расчетах не учитывались тепловые потери, поэтому вычислялось значение коэффициента направленного действия (КНД), а не КУ. По оценке, тепловые потери в зеркальной антенне составят 0.2...1.0 дБ в зависимости от особенностей конструкции и диапазона частот.

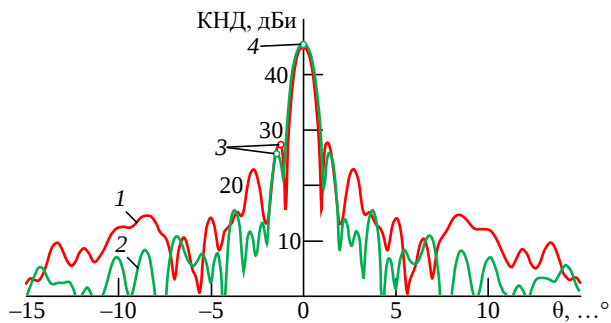


Рис. 10. Диаграмма направленности антенны на частоте 19.172 ГГц: 1 – с облучателем 08150.6220-0; 2 – с облучателем ЭИФ5.468587.001; 3 – главный максимум; 4 – первый боковой лепесток

Fig. 10. Antenna radiation pattern at a frequency of 19.172 GHz: 1 – with 08150.6220-0 feed; 2 – with ЭИФ 5.468587.001 feed; 3 – main maximum; 4 – first side lobe

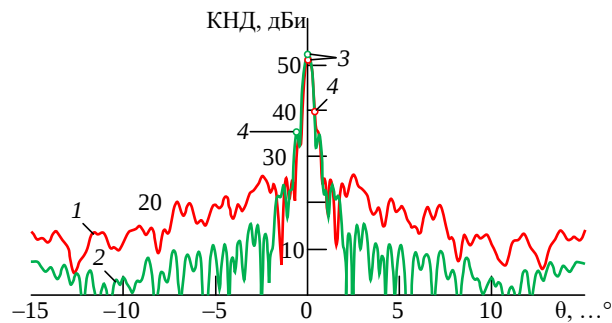


Рис. 11. Диаграмма направленности антенны на частоте 43.924 ГГц: 1 – с облучателем 08150.6220-0; 2 – с облучателем ЭИФ5.468587.001; 3 – главный максимум; 4 – первый боковой лепесток

Fig. 11. Antenna radiation pattern at a frequency of 43.924 GHz: 1 – with 08150.6220-0 feed; 2 – with ЭИФ 5.468587.001 feed; 3 – main maximum; 4 – first side lobe

Табл. 2. Параметры сравниваемых облучателей в составе зеркальной антенны диаметром 12 м

Tab. 2. Parameters of compared feeds as part of a reflector antenna with a diameter of 12 m

f, ГГц	КНД _{max} , дБи		УБЛ, дБ	
	С обл. 08150.6220-0	С обл. ЭИФ5.468587.001	С обл. 08150.6220-0	С обл. ЭИФ5.468587.001
19.172	45.3	46	-17.9	-20.1
19.792	45.7	45.9	-16.7	-21.3
43.924	51.3	52.7	-12.0	-16.7
44.542	51.5	52.7	-10.9	-17.4

На рис. 10 приведены результаты расчета КНД двухзеркальной антенны с облучателем 08150.6220-0 (рис. 10, а) и облучателем ЭИФ5.468587.001 (рис. 10, б) на нижней частоте приема, а на рис. 11 – на нижней частоте передачи. ДН приведены для сечения $\varphi = 0$. В диапазоне приема приведены ДН для правой круговой поляризации, в диапазоне передачи – для левой круговой поляризации.

На рис. 10, 11 цифрами 3, 4 обозначены уровень главного максимума и первого бокового лепестка соответственно.

В табл. 2 приведены основные результаты расчетов параметров сравниваемых облучателей в составе зеркальной антенны диаметром 12 м.

Заключение. Результаты электродинамических расчетов показали эффективность использования разработанной двухдиапазонной облучающей системы Ka/Q-диапазонов. Описанный в настоящей статье облучатель ЭИФ5.468587.001 позволяет формировать осесимметричную ДН зеркальной антенны с более

высоким КНД (на 0.7 дБи в режиме приема и на 1.4 дБи в режиме передачи) и с более низким уровнем внеосевых излучений по сравнению с облучателем 08150.6220-0, используемым в настоящее время в составе ЗССС производства АО "РЕШЕТНЕВ". Уровень боковых лепестков ДН антенны при использовании облучающей системы ЭИФ5.468587.001 на 2.2 дБ в режиме приема и на 4.7 дБ в режиме передачи меньше, чем в зеркальной антенне 08150.6220-0.

Недостатком описанного облучателя является малое значение развязки между каналами приема и передачи в диапазоне частот передачи, которое составило 20 дБ. Согласно требованиям Международного консультативного комитета по радио, значение развязки для работы ЗССС в диапазоне частот передачи должно быть не менее 90 дБ. Для увеличения значения развязки поставлена задача по разработке внешнего полосно-пропускающего фильтра приемного тракта на порту RX-облучателя.

Список литературы

1. Урличич Ю., Прохоров С. Цели и задачи программы "Сфера" // Технологии и средства связи. 2019. № S1. С. 26–32.

2. Satellite communication station for Ka and Q-bands / D. D. Dmitriev, A. B. Gladyshev, V. N. Ratuschnyak, V. N. Tyapkin // J. of Physics: Conf. Ser. 2021. Vol. 1889, iss. 4. P. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042014

3. Гладышев А. Б., Дмитриев Д. Д., Тяпкин И. В. Экспериментальные исследования антенны земной станции перспективной системы спутниковой связи // Антенны и распространение радиоволн: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. 24–26 нояб. 2021 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. С. 80–83.

4. Исследование направленных характеристик антенны земной станции спутниковой связи методом спирального сканирования / А. Б. Гладышев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Ратушняк, О. Б. Грицан // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 7. С. 830–839. doi: 10.17516/1999-494X-0349

5. Галкина Э. В., Кирпанев А. В., Михайлов А. Н. Двухдиапазонные антенны с поляризационными рефлекторами // СВЧ-электроника. 2019. Т. 8, № 1. С. 40–43.

6. Многодиапазонные антенны / Е. В. Овчинникова, М. А. Соков, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин, Нгуен Динь То // Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2021. Т. 180, № 1. С. 33–39.

7. Yasin A., Yang J., Ostling T. A Compact Dual-Band Feed for Reflector Antennas Based on Choke Horn and Circular Eleven Antenna // IEEE Trans. Antennas Propag. 2009. Vol. 57, iss 10. P. 3300–3302. doi: 10.1109/TAP.2009.2029385

8. Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna / A. Kanso, R. Chantalat, M. Thevenot, U. Naeem, S. Bila, T. Monediere // 41st Europ. Microwave Conf. (EuMC). Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011. P. 866–869. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101849

9. Quad band X/Ka horn antenna and feed chain designs / J. Teniente, I. Gómez-López, R. Caballero-Nagore, G. Crespo-López, A. Martínez-Agoñes // 11th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017. P. 3432–3436. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928428

10. 3D Printing of a Monolithic K/Ka-Band Dual-Circular Polarization Antenna-Feeding Network / G. Addamo, M. Lumia, F. Calignano, F. Paonessa, G. Virone, D. Manfredi, L. Iuliano, O. A. Peverini // IEEE Access.

2021. Vol. 9. P. 88243–88255. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3089826.

11. Ridge-Waveguide Stub Filters for Earth Observation Dual-Band Antenna-Feed Systems / O. A. Peverini, G. Addamo, G. Virone, M. Lumia, M. Grilli, B. Fiorelli // IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Limoges, France, 06–08 July 2022. P. 1–3. doi: 10.1109/NEMO51452.2022.10038952

12. Корчемкин Ю. Б., Кочетков О. С. Поляризатор для систем спутниковой связи с поляризационным уплотнением // Тр. МАИ. 2013. № 65. С. 33.

13. Demountable K/Q Band Coaxial Feed for Cassegrain Antenna / K. V. Lemberg, N. M. Boev, A. V. Kantyshev, O. B. Grican, D. A. Shabanov // IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 11–13 Nov. 2022. P. 1150–1153.

14. Пат. RU 2777698 C1. МПК H01Q 13/02 (2006/01), H01Q 5/30 (2015/01). Двухчастотный облучатель зеркальной антенны / К. В. Лемберг, Б. А. Беляев, И. В. Говорун, А. А. Лексиков, Н. М. Боев, И. В. Подшивалов, О. Б. Грицан, А. В. Кантышев. Опубл. 08.08.2022. Бюл. № 22.

15. Качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн / А. Васильченко, И. Схольц, Де Раад Вальтер, Г. Ванденбош // Технологии в электронной промышленности. 2008. Т. 23, № 3. С. 52–56. URL: https://tech-e.ru/wp-content/uploads/2008_03_52.pdf (дата обращения 15.01.2024).

16. Куксенко С. П. Электромагнитная совместимость: моделирование / под ред. Т. Р. Газизова. Томск: В-Спектр, 2018. 188 с.

17. Габбазова Р. Н. Обзор программных пакетов для моделирования антенн и антенных устройств СВЧ // Лучшая студенческая статья 2018: сб. ст. XVII Междунар. науч.-исслед. конкурса: в 3 ч., Пенза, 25 нояб. 2018 г. Пенза: МЦНС "Наука и просвещение", 2018. Ч. 1. С. 119–122.

Информация об авторах

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – доктор технических наук (2023), доцент (2015), профессор кафедры автоматизированных систем управления Воздушно-космических сил военного учебного центра Сибирского федерального университета. Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь; спутниковая радионавигация; радиолокация.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: M_E_Shevchenko@mail.ru, meshevchenko@etu.ru

E-mail: dmitriev121074@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6438-6094>

Гладышев Андрей Борисович – кандидат технических наук (2020), доцент (2022), начальник кафедры радиоэлектронной борьбы военного учебного центра Сибирского федерального университета. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь; спутниковая радионавигация; радиолокация.

Адрес: Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660041, Россия

E-mail: a-ghonass@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0903-6960>

Грицан Олег Борисович – генеральный конструктор ООО «НПЦ "Малые космические аппараты"». Автор 17 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковая связь, спутниковая радионавигация.
Адрес: ООО «НПЦ "МКА"», ул. Транзитная, д. 7, корп. 1, Железногорск, Красноярский край, 662970, Россия
E-mail: gritsan@npc-mka.ru

References

1. Urlichich Yu., Prokhorov S. Goals and Objectives of Sphere Program. Technologies and Communications. 2019, no. S1, pp. 26–32. (In Russ.)
2. Dmitriev D. D., Gladyshev A. B., Ratuschnyuk V. N., Tyapkin V. N. Satellite Communication Station for Ka and Q-Bands. J. of Physics: Conf. Ser. 2021, vol. 1889, iss. 4, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1889/4/042014
3. Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Tyapkin I. V. Experimental Studies of the Earth Station Antenna of a Promising Satellite Communication System. Antennas and Radio Wave Propagation: Reports of the All-Russ. Sci. and Tech. Conf. 24–26 Nov. 2021. St Petersburg, Izd-vo SPbSETU "LETI", 2021, pp. 80–83. (In Russ.)
4. Gladyshev A. B., Dmitriev D. D., Ratushniak V. N., Gritsan O. B. Investigation of the Directional Characteristics of the Antenna of the Satellite Earth Station Using the Spiral Scanning Method. J. Of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2021, vol. 14, no. 7, pp. 830–839. doi: 10.17516/1999-494X-0349. (In Russ.)
5. Galkina E. V., Kirpanev A. V., Mikhailov A. N. Dual-Band Antennas with Polarizing Reflectors. Microwave Electronics. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 40–43. (In Russ.)
6. Ovchinnikova E. V., Sokov M. A., Kondratyeva S. G., Shmachilin P. A., Nguyen Dinh Tho. Multi-Band Antennas. Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies. 2021, vol. 180, no. 1, pp. 33–39. (In Russ.)
7. Yasin A., Yang J., Ostling T. A Compact Dual-Band Feed for Reflector Antennas Based on Choke Horn and Circular Eleven Antenna. IEEE Trans. Antennas Propag. 2009, vol. 57, iss 10, pp. 3300–3302. doi: 10.1109/TAP.2009.2029385
8. Kanso A., Chantalat R., Thevenot M., Naeem U., Bila S., Monediere T. Multifeed EBG Dual Band Antenna to Feed a Reflector Antenna. 41st Europ. Microwave Conf. (EuMC), Manchester, UK, 10–13 Oct. 2011, pp. 866–869. doi: 10.23919/EuMC.2011.6101849
9. Teniente J., Gómez-López I., Caballero-Nagore R., Crespo-López G., Martínez-Agoñes A. Quad Band X/Ka Horn Antenna and Feed Chain Designs. 11th Europ. Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017, pp. 3432–3436. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928428
10. Addamo G., Lumia M., Calignano F., Paonessa F., Virone G., Manfredi D., Iuliano L., Peverini O. A. 3D Printing of a Monolithic K/Ka- Band Dual-Circular Polarization Antenna-Feeding Network. IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 88243–88255. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3089826
11. Peverini O. A., Addamo G., Virone G., Lumia M., Grilli M., Fiorelli B. Ridge-Waveguide Stub Filters for Earth Observation Dual-Band Antenna-Feed Systems. IEEE MTT-S Intern. Conf. on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Limoges, France, 06–08 July 2022, pp. 1–3. doi: 10.1109/NEMO51452.2022.10038952
12. Korchemkin Yu. B., Kochetkov O. S. Polarizer for Satellite Communication Systems with Polarization Multiplexing. Proc. of MAI. 2013, no. 65, p. 33. (In Russ.)
13. Lemberg K. V., Boev N. M., Kantyshev A. V., Grican O. B., Shabanov D. A. Demountable K/Q Band Coaxial Feed for Cassegrain Antenna. IEEE Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, 11–13 Nov. 2022, pp. 1150–1153.
14. Lemberg K. V., Belyaev B. A., Govorun I. V., Leksikov A. A., Boev N. M., Podshivalov I. V., Gritsan O. B., Kantyshev A. V. Dual-Frequency Reflector Antenna Feed. Pat. RU 2777698 C1. МПК H01Q 13/02 (2006/01), H01Q 5/30 (2015/01). Publ. 08.08.2022. Bull. no. 22. (In Russ.)
15. Vasil'chenko A., Skhol'ts I., Val'ter De Raad, Vandenbosh G. Qualitative Assessment of Computational Methods of Electrodynamics Using the Example of Software Products for High-Frequency Modeling of Microstrip Antennas. Technologies in the Electronics Industry. 2008, vol. 23, no. 3, pp. 52–56. Available at: https://tech-e.ru/wp-content/uploads/2008_03_52.pdf (accessed 15.01.2024).
16. Kuksenko S. P. *Elektromagnitnaya sovместimost': modelirovanie* [Electromagnetic Compatibility: Modeling]. Ed. by T. R. Gazizov. Tomsk, V-Spectr, 2018, 188 p. (In Russ.)
17. Gabbazova R. N. Review of Software Packages for Modeling Antennas and Microwave Antenna Devices. Best student article 2018: articles of the XVII Intern. Research Competition. Pt. 1. Penza, 25 Nov. 2018. Penza, MTsNS "Nauka i prosveshchenie", 2018, pp. 119–122. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitry D. Dmitriev, Dr Sci. (Eng.) (2023), Associate Professor (2015), Professor of the Department Automated Control Systems of Siberian Federal University. Author of more than 170 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation; radar.
Address: Siberian Federal University, 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: dmitriev121074@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6438-6094>

Andrey B. Gladyshev, Cand. Sci. (Eng.) (2020), Associate Professor (2022), Head of the Electronic Warfare Department of Siberian Federal University. Author of more than 80 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation; radar.

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

E-mail: a-glonass@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0903-6960>

Oleg B. Gritsan, general designer of "Research and Production Center "Small Spacecraft". Author of 17 scientific papers. Area of expertise: satellite communications; satellite radio navigation.

Address: LLC «Research and Production Center "Small Spacecraft"», 7, bld. 1, Transitnaya St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region 662970, Russia

E-mail: gritsan@npc-mka.ru

Решение собственной задачи прямоугольных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением методом Фурье

И. Г. Мироненко, С. С. Соколов, А. А. Иванов✉

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

✉ aai2@yandex.ru

Аннотация

Введение. Современные универсальные средства компьютерного моделирования позволяют выполнять анализ сложных волноводных структур, канализирующих электромагнитную энергию. Для оценки получаемых результатов расчета бывает необходимо сравнить их с известным "точным" значением и после этого провести калибровку рассматриваемой электродинамической модели. Найти искомое значение можно с помощью метода Фурье, позволяющего определить постоянную распространения в регулярном прямоугольном волноводе с частичным заполнением диэлектриком и оценить его канализирующие свойства в различных диапазонах длин волн.

Цель работы. Построение вычислительной модели расчета регулярного волновода с произвольным расположением диэлектрика на поперечном сечении методом Фурье, определение дисперсионных характеристик анализируемых структур в миллиметровом диапазоне длин волн.

Материалы и методы. Математическая модель для анализа волновода с частичным заполнением диэлектриком выполнена на базе уравнений Максвелла с применением граничных условий для касательных и нормальных компонент электромагнитного поля.

Результаты. Проведен численный анализ дисперсионных характеристик структур со сложным диэлектрическим заполнением. Показана методика построения расчетной модели для поиска постоянной распространения в прямоугольном волноводе с произвольным расположением диэлектрического заполнения, что может являться основой для анализа слоистых диэлектрических структур со сложной формой поперечного сечения и различной относительной диэлектрической проницаемостью.

Заключение. Созданные математические модели позволили численно оценить канализирующие свойства волноводов с диэлектрическим заполнением в СВЧ-диапазоне.

Ключевые слова: метод Фурье анализа, волноводы с диэлектрическим заполнением, канализирующие диэлектрические структуры, линейные диэлектрики

Для цитирования: Мироненко И. Г., Соколов С. С., Иванов А. А. Решение собственной задачи прямоугольных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением методом Фурье // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 52–60. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-52-60

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.06.2024; принята к публикации после рецензирования 06.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Solution to the Eigenvalue Problem of Rectangular Waveguides with Partial Dielectric Filling by Fourier Transform

Igor G. Mironenko, Sergey S. Sokolov, Arkady A. Ivanov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aai2@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern computer simulation tools can be used to analyze complex waveguide structures channeling electromagnetic energy. In order to verify the obtained calculation results, they should be compared with a known "exact" value followed by calibration of the considered electrodynamic model. The desired value can be found using the method of Fourier transform, which allows the propagation constant in a regular rectangular waveguide with partial filling with a dielectric to be determined and its channeling properties in various wavelength ranges to be evaluated.

Aim. Construction of a computational model for calculating a regular waveguide with an arbitrary arrangement of the dielectric on the cross section by the Fourier method, determination of the dispersion characteristics of the analyzed structures in the millimeter wavelength range.

Materials and methods. A mathematical model for the analysis of a waveguide with partial dielectric filling is based on Maxwell's equations using boundary conditions for tangential and normal components of the electromagnetic field.

Results. A numerical analysis of the dispersion characteristics of structures with complex dielectric filling was carried out. A methodological approach to constructing a computational model for searching for the propagation constant in a rectangular waveguide with an arbitrary arrangement of dielectric filling is proposed. This approach can serve as the basis for analyzing layered dielectric structures with a complex cross-sectional shape and different values of relative permittivity.

Conclusion. The developed mathematical models made it possible to numerically evaluate the channeling properties of waveguides with dielectric filling in the microwave range.

Keywords: Fourier transform, waveguides with dielectric filling, channeling dielectric structures, linear dielectrics

For citation: Mironenko I. G., Sokolov S. S., Ivanov A. A. Solution to the Eigenvalue Problem of Rectangular Waveguides with Partial Dielectric Filling by Fourier Transform. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 52–60. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-52-60

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

Submitted 30.06.2024; accepted 06.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. Существующие средства САПР позволяют успешно выполнять расчеты сложных волноведущих структур, однако для получения искомого результата требуются значительные вычислительные и временные ресурсы [1–3]. Применение рассматриваемого в статье анализа с использованием метода Фурье позволяет получать искомый результат, а именно находить постоянную распространения электромагнитной волны в волноводной структуре со слоистым диэлектрическим заполнением без существенных затрат. Полученный результат становится ориентиром для калибровки универсальных САПР, используемых

при расчете волноведущих структур [2, 3], тем самым обеспечивая экономию времени в процессе проектирования СВЧ-устройства. На основе таких структур, например, возможно построение элементов волноводных фильтров, состоящих из отрезков волноводов с частичным диэлектрическим заполнением [4]. При этом линейные или нелинейные диэлектрики могут быть слоистыми, синтезированными из различных материалов с близкими диэлектрическими проницаемостями, имеющими разнонаправленные температурные коэффициенты, что в свою очередь позволяет создавать температурно-стабилизированные структуры с

частотными параметрами, практически не изменяемыми в широком диапазоне температур. Таким образом, данным методом возможно провести анализ зависимости постоянной распространения в волноводе с частичным диэлектрическим заполнением с учетом влияния температуры. Решение и постановка такой задачи будут проанализированы в материале других публикаций.

Постановка задачи. Рассмотрим решение собственной задачи о распределении поля на поперечном сечении и нахождении постоянной распространения в регулярных волноводах с частичным диэлектрическим заполнением [5–14]. В случае гармонических напряженностей электрического $\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}$ и магнитного $\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{H}(x, y, z)e^{j\omega t}$ полей уравнения Максвелла для этих волноводов можно представить в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} &= -j\omega\mu_0\dot{\mathbf{H}}; \\ \operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} &= j\omega\varepsilon_0\varepsilon(x, y)\dot{\mathbf{E}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-10} \frac{\text{Гн}}{\text{мм}}$;

$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Ф}}{\text{мм}}$; $\varepsilon(x, y)$ – кусочно-постоянная функция распределения диэлектрической проницаемости на поперечном сечении.

В соответствии с цилиндрической симметрией волноводов решение уравнений (1) имеет вид плоских неоднородных волн, распространяющихся вдоль оси z с постоянной распространения γ :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}(x, y)e^{j(\omega t - \gamma z)}; \\ \dot{\mathbf{H}} &= \mathbf{H}(x, y)e^{j(\omega t - \gamma z)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{E}(x, y) = \mathbf{e}_x E_x(x, y) + \mathbf{e}_y E_y(x, y) + \mathbf{e}_z E_z(x, y)$;
 $\mathbf{H}(x, y) = \mathbf{e}_x H_x(x, y) + \mathbf{e}_y H_y(x, y) + \mathbf{e}_z H_z(x, y)$.

Уравнения Максвелла (1) для решений в виде (2) можно преобразовать к уравнению относительно вектора $\mathbf{E}(x, y)$:

$$\nabla_{\perp}^2 \mathbf{E}(x, y) + \chi^2 \mathbf{E}(x, y) = 0, \quad (3)$$

где $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – лапласиан в поперечных

координатах $\chi^2 = k^2 \varepsilon(x, y) - \gamma^2$ ($k^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0$).

Придадим волновому уравнению (3) операторный вид, введя линейный дифференциальный оператор $\hat{L} = \nabla_{\perp}^2 + \chi^2$, тогда

$$\hat{L}\dot{\mathbf{E}}(x, y) = 0. \quad (4)$$

Общий подход к решению (4) состоит в выборе способа аппроксимации векторной функции $\mathbf{E}(x, y)$, позволяющего свести решение дифференциального уравнения к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов аппроксимирующей функции. Уравнения Максвелла согласуют поиск функций, аппроксимирующих $\mathbf{E}(x, y)$, с вычислением постоянной распространения, и в этом смысле поиск приближенного решения уравнения (4) приводит к двум самостоятельным задачам: нахождению постоянной распространения γ и распределения поля на поперечном сечении волновода. Следует заметить, что нахождение постоянной распространения имеет больший приоритет, чем распределение поля, которое во многих задачах может быть описано на качественном уровне. Однако общее решение собственной задачи прямоугольных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением должно быть связано с поиском γ и вида $\mathbf{E}(x, y)$. В этом случае напряженность магнитного поля $\mathbf{H}(x, y)$ найдется из уравнений Максвелла (1).

Разложение в ряд Фурье $\mathbf{E}(x, y)$ в ортогональном базисе. Рассмотрим способ решения уравнения (4) разложением $\mathbf{E}(x, y)$ в ряд Фурье в ортогональном базисе, образованном координатными функциями, представляющими собственное решение полого прямоугольного волновода сечением $(a \times b)$:

$$\begin{aligned} E_{x,mn}(x, y) &= \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right); \\ E_{y,mn}(x, y) &= \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right); \\ E_{z,mn}(x, y) &= \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $m = 0, 1, \dots$; $n = 0, 1, \dots$.

Функции (5) удовлетворяют граничным условиям на идеально проводящем контуре поперечного сечения:

$$\begin{aligned} E_{x, mn}(x, y) \Big|_{y=0, b} &= 0; \\ E_{y, mn}(x, y) \Big|_{x=0, a} &= 0; \\ E_{z, mn}(x, y) \Big|_{x=0, a} &= 0, \\ & \Big|_{y=0, b} \end{aligned}$$

Собственный вектор $\mathbf{E}_{mn}(x, y)$ на поперечном сечении имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{mn}(x, y) &= \mathbf{e}_x E_{x, mn}(x, y) + \\ &+ \mathbf{e}_y E_{y, mn}(x, y) + \mathbf{e}_z E_{z, mn}(x, y). \end{aligned}$$

Для пары собственных векторов $\mathbf{E}_{mn}(x, y)$, $\mathbf{E}_{pq}(x, y)$ в ортогональном базисе определено скалярное произведение

$$\begin{aligned} (\mathbf{E}_{mn}(x, y), \mathbf{E}_{pq}(x, y)) &= \\ &= \int_S (E_{x, mn}(x, y) E_{x, pq}(x, y) + \\ &+ E_{y, mn}(x, y) E_{y, pq}(x, y) + \\ &+ E_{z, mn}(x, y) E_{z, pq}(x, y)) dS, \end{aligned} \quad (6)$$

где S – поперечное сечение волновода.

Скалярное произведение собственных векторов удовлетворяет условию ортогональности

$$\begin{aligned} (\mathbf{E}_{mn}(x, y), \mathbf{E}_{pq}(x, y)) &= \\ &= \begin{cases} 0, & \text{если } p \neq m \text{ или } n \neq q; \\ \frac{ab}{4}, & \text{если } p = m, n = q. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Искомый вектор $\mathbf{E}(x, y)$ в (4) представим разложением в ряд Фурье в ортогональном базисе

$$\mathbf{E}(x, y) = \sum_{m=0, 1, \dots}^{\infty} \sum_{n=0, 1, \dots}^{\infty} a_{m, n} \mathbf{E}_{mn}(x, y), \quad (8)$$

где $a_{m, n}$ – коэффициенты Фурье.

Коэффициенты Фурье можно найти на основании (7). Умножив левую и правую части разложения (8) на собственный вектор

$\mathbf{E}_{pq}(x, y)$, образуем скалярные произведения (6) и получим

$$\begin{aligned} &\int_S (\mathbf{E}(x, y), \mathbf{E}_{pq}(x, y)) dS = \\ &= \sum_{m=0, 1, \dots}^{\infty} \sum_{n=0, 1, \dots}^{\infty} a_{m, n} \int_S (\mathbf{E}_{mn}(x, y), \mathbf{E}_{pq}(x, y)) dS. \end{aligned} \quad (9)$$

В правой части соотношения (9) интеграл не равен нулю только при $m = p$, $n = q$, поэтому коэффициенты Фурье определяются как

$$a_{m, n} = \int_S (\mathbf{E}(x, y), \mathbf{E}_{mn}(x, y)) dS. \quad (10)$$

Из теории рядов Фурье известно, что ряд (8) по собственным векторам уравнения (3) сходится абсолютно и равномерно к $\mathbf{E}(x, y)$ при определении коэффициентов $a_{m, n}$ в виде (10).

Построение системы алгебраических уравнений. Подставив (8) в операторные уравнения (4), получим

$$\begin{aligned} &\hat{L} \left(\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{m, n} \mathbf{E}_{mn}(x, y) \right) = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{m, n} \hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Умножив обе части равенства (11) скалярно на собственный вектор $\mathbf{E}_{pq}(x, y)$, получим

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{m, n} \int_S (\mathbf{E}_{pq}(x, y), \hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y)) dS = 0. \quad (12)$$

Обозначим

$$\int_S (\mathbf{E}_{pq}(x, y), \hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y)) dS = f_{pq, mn}(\gamma). \quad (13)$$

Соотношению (12) можно придать вид бесконечной системы однородных алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье ряда (8):

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{m, n} f_{pq, mn}(\gamma) = 0. \quad (14)$$

Редукция бесконечной системы уравнений (14) возможна при условии конечного числа функций разложения в (8). Тогда при конечных суммах соотношение (14) представляет собой невязку (11). Фактически это означает замену представления искомой функции в виде ряда Фурье ее аппроксими-

мацией конечным числом функций ортогонального базиса разложения. Допустим, что максимальное число функций определено выбором значений M и N . Тогда при относительно малых значениях M и N , а следовательно, и порядка системы уравнений можно надеяться на достаточно быструю сходимость аппроксимируемой функции $\dot{\mathbf{E}}(x, y)$ к функции, определенной разложением в ряд Фурье при увеличении M и N . Это означает, что решение редуцированной системы уравнений при $M \rightarrow \infty$ и $N \rightarrow \infty$ окажется сколь угодно близким к решению бесконечной системы уравнений (14). Строгое обоснование такого подхода к (14) приводится в вычислительной математике [12].

Примеры решения задач прямоугольных волноводов с частичным диэлектрическим заполнением. Аппроксимируем искомую функцию $\mathbf{E}(x, y)$ конечным числом функций из бесконечного ортогонального базиса геометрических функций (5). Найдем в явном виде элементы системы уравнений $f_{pq, mn}(\gamma)$, подставив в (13) соотношения для $\mathbf{E}_{mn}(x, y)$. Раскрыв скалярное произведение, получим

$$f_{pq, mn}(\gamma) = \int_S \left[E_{x, pq}(x, y) (\hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y))_x + E_{y, pq}(x, y) (\hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y))_y + E_{z, pq}(x, y) (\hat{L} \mathbf{E}_{mn}(x, y))_z \right] dS. \quad (15)$$

Вид оператора $\hat{L}$ известен, собственные функции и собственные векторы определены соотношением (5), поэтому после преобразований соотношение (15) можно привести к виду

$$f_{pq, mn}(\gamma) = k^2 \left(J_{pq, mn}^{(1)} + J_{pq, mn}^{(2)} + J_{pq, mn}^{(3)} \right) - \left[\gamma^2 + \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right] I_{pq, mn}, \quad (16)$$

где $I_{pq, mn} = \begin{cases} 0 & \text{при } m \neq p \text{ или } n \neq q; \\ 3ab/4 & \text{при } m = p, n = q; \end{cases}$

$$J_{pq, mn}^{(1)} = \int_S \varepsilon(x, y) E_{x, mn}(x, y) E_{x, pq}(x, y) dS;$$

$$J_{pq, mn}^{(2)} = \int_S \varepsilon(x, y) E_{y, mn}(x, y) E_{y, pq}(x, y) dS;$$

$$J_{pq, mn}^{(3)} = \int_S \varepsilon(x, y) E_{z, mn}(x, y) E_{z, pq}(x, y) dS.$$

Система линейных уравнений (14) однородна и имеет отличные от нуля решения в том и только в том случае, если ее определитель равен нулю [15]. Определитель системы уравнений зависит от постоянной распространения γ , и его обнуление является решением для постоянной распространения. Очевидно, вид поперечного сечения с неполным диэлектрическим заполнением определяет вид соотношений для вычисления элементов матрицы системы уравнений (14) [4, 7].

Для волновода, поперечное сечение которого показано на рис. 1, a , интегралы в (14), зависящие от положения диэлектрического стержня, могут быть представлены в виде

$$J_{pq, mn}^{(1)} = \int_0^{\Delta} \cos\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\ \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\ + \varepsilon \left[\int_{\Delta}^{\Delta+w} \cos\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \right. \\ \left. \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \right] + \\ + \int_{\Delta+w}^a \cos\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\ \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\ + \int_0^a \cos\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\ \times \int_d^b \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy;$$

$$J_{pq, mn}^{(2)} = \int_0^{\Delta} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\ \times \int_0^d \cos\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\ + \varepsilon \left[\int_{\Delta}^{\Delta+w} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \right. \\ \left. \times \int_0^d \cos\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \right] + \\ + \int_0^a \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\ \times \int_d^b \cos\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy;$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{\Delta+w}^a \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\
 & \times \int_0^d \cos\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\
 & + \int_0^a \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\
 & \times \int_d^b \cos\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy; \\
 J_{pq,mn}^{(3)} = & \int_0^{\Delta} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\
 & \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\
 & + \varepsilon \left[\int_{\Delta}^{\Delta+w} \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \right. \\
 & \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \left. + \right. \\
 & + \int_{\Delta+w}^a \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\
 & \times \int_0^d \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy + \\
 & + \int_0^a \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) dx \times \\
 & \times \int_d^b \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Для волноводов, поперечные сечения которых показаны на рис. 1, б, в, интегралы в (14), зависящие от расположения диэлектрического стержня, могут быть представлены в виде, аналогичном (17). Опустим подробности простых преобразований и приведем результаты расчета постоянных распространения волн основного типа в волноводах, поперечные сечения которых представлены на рис. 1, а–в, при $a = 7.2$ мм, $b = 3.6$ мм и центральном положении диэлектрического стержня. На рис. 2–4 приведены результаты расчетов постоянной распространения волны основного типа в волноводах на частоте 30 ГГц.

Распределения напряженностей электрического и магнитного полей на поперечном сечении при известной постоянной распространения и коэффициентов Фурье как решений однородной алгебраической системы уравнений (14) определены соотношениями (8) и (5), поэтому поставленная задача формально решена. Однако графическое изображение гибридных полей с помощью линий поля в волноводах с частичным диэлектрическим заполнением лишено наглядности. С информационных позиций оправданно построение продольной составляющей вектора Пойнтинга на поперечном сечении волновода как распределения плотности энергии, переносимой волной.

Приведем соотношения для расчета продольной составляющей вектора Пойнтинга $S_z = \frac{1}{2} \text{Re}[\dot{\mathbf{E}}, \dot{\mathbf{H}}^*]_z$. После подстановки соотношений для напряженности поля (2) и (8) найдем, что

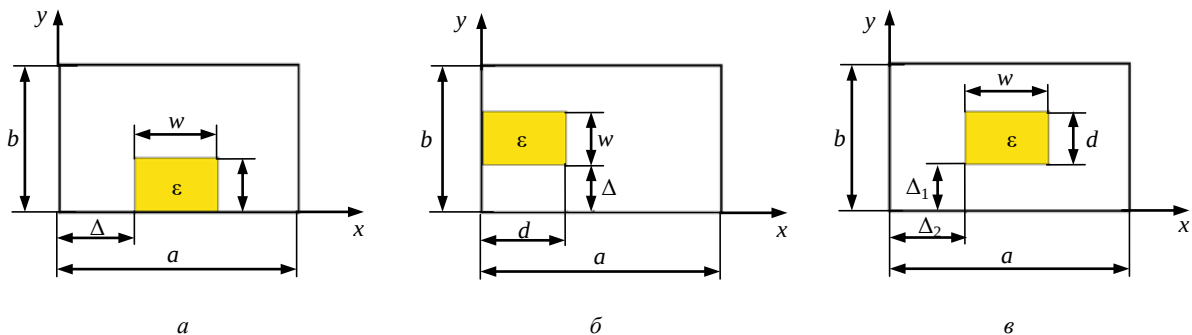


Рис. 1. Поперечные сечения волноводов в системе координат: а – расположение диэлектрика вдоль широкой стенки; б – расположение диэлектрика вдоль узкой стенки; в – расположение диэлектрика по центру

Fig. 1. Cross sections of waveguides in the coordinate system: а – the location of the dielectric along a wide wall; б – the location of the dielectric along a narrow wall; в – the location of the dielectric in the center

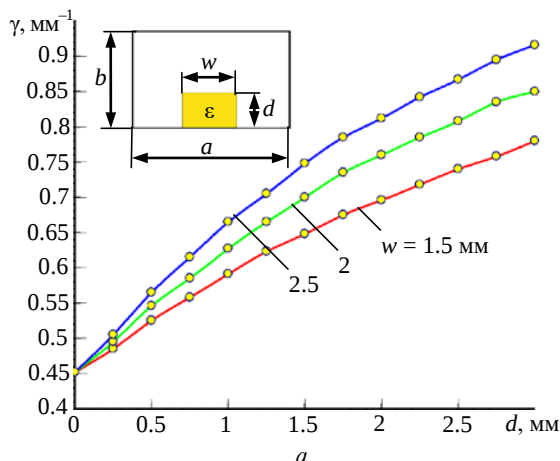


Рис. 2. Зависимость постоянной распространения для волновода (рис. 1, а) от d и w : а – при $\varepsilon = 4$; б – при $\varepsilon = 12$

Fig. 2. Dependence of the propagation constant for the waveguide (Fig. 1, а), on d and w : а – at $\varepsilon = 4$; б – at $\varepsilon = 12$

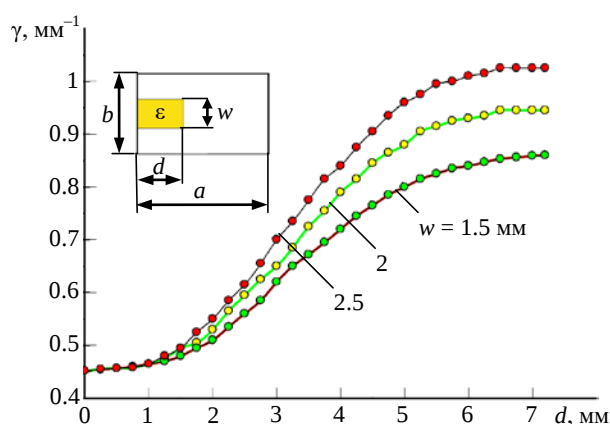
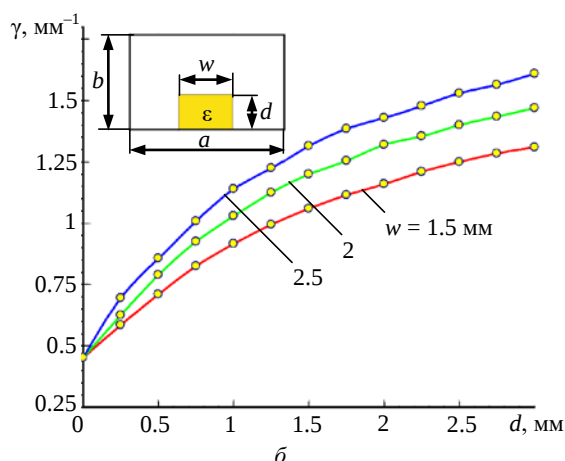


Рис. 3. Зависимость постоянной распространения для волновода (рис. 1, б) от d и w при $\varepsilon = 4$

Fig. 3. Dependence of the propagation constant for the waveguide (Fig. 1, б) on d and w at $\varepsilon = 4$

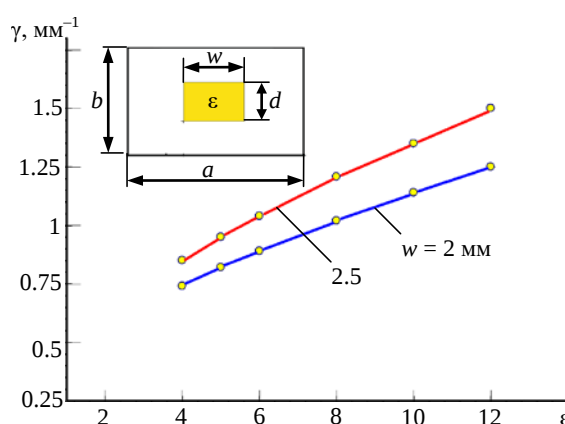


Рис. 4. Зависимость постоянной распространения для волновода (рис. 1, в) от ε при $d = w$

Fig. 4. Dependence of the propagation constant for the waveguide (Fig. 1, в), on ε at $d = w$

$$S_z = \frac{\gamma}{2\omega\mu_0} \times \left[\left(\sum_{m=0,1,\dots}^M \sum_{n=0,1,\dots}^N a_{m,n} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right)^2 + \left(\sum_{m=0,1,\dots}^M \sum_{n=0,1,\dots}^N a_{m,n} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \right)^2 \right].$$

Очевидно, что расчет плотности энергии на поперечном сечении имеет смысл только для конкретных конструкций волноводов, а ее количественные характеристики будут относительными, так как коэффициенты Фурье являются корнями однородной системы уравнений.

Заключение. Проведен численный анализ дисперсионных характеристик структур со сложным диэлектрическим заполнением. Пока-

зана методика построения расчетной модели для поиска постоянной распространения в прямоугольном волноводе с произвольным расположением диэлектрического заполнения, что может являться основой для анализа слоистых диэлектрических структур со сложной формой поперечного сечения и различной относительной диэлектрической проницаемостью. Созданные математические модели позволили численно оценить канализирующие свойства волноводов с диэлектрическим заполнением в СВЧ-диапазоне. Представленный метод для расчета сложной диэлектрической структуры позволяет выполнить численные оценки ее характеристик в широком диапазоне частот, а для разработчиков и производителей высокочастотной техники позволит проектировать волноводные элементы с требуемыми техническими характеристиками.

Список литературы

1. Банков С. Е., Курушин А. А., Разевиг В. Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS. М.: Солон-Пресс, 2005. 285 с.
2. Банков С. Е., Курушин А. А. Анализ и оптимизация СВЧ-структур с помощью HFSS / под ред. С. Е. Банкова. 2-е изд., доп. М.: Солон-Пресс, 2004. 216 с.
3. Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. М.: Солон-Пресс, 2003. 496 с.
4. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах / А. А. Иванов, И. Г. Мironenko, С. Ф. Карманенко и др. СПб.: Элмор, 2007. 162 с.
5. Мironenko И. Г., Иванов А. А. Электромагнитные поля и волны. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2021. 169 с.
6. Вольман В. И., Пименов Ю. В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 487 с.
7. Егоров Ю. В. Частично-заполненные прямоугольные волноводы. М.: Сов. радио, 1967. 216 с.
8. Левин Л. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981. 311 с.
9. Гринев А. Ю., Гиголо А. И. Математические основы и методы решения задач электродинамики: учеб. пособие для студентов по специальностям "Радиотехника" и "Радиоэлектронные системы и комплексы". М.: Радиотехника, 2015. 214 с.
10. Гринев А. Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2012. 336 с.
11. Shäfer M. Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 321 p.
12. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980. 536 с.
13. Вычислительные методы прикладной электродинамики / Д. Д. Габриэльян, Г. Ф. Заргано, М. Ю. Звездина и др. М.: Радиотехника, 2009. 159 с.
14. On the Numerical Solution of Two- Dimensional Potencial Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method / G. F. Fairweather, J. Rizzo, D. J. Shippy, Y. S. Wu // J. Computational Phisics. 1979. Vol. 31. P. 96–112.
15. Курош А. Г. Курс высшей алгебры. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. 431 с.

Информация об авторах

Мironenko Игорь Германович – доктор технических наук (1979), профессор (1981) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 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. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: eltech-mit-mig@gmail.com

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук (1993), профессор (1995) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 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. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: sovet@etu.ru

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. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aai2@yandex.ru

References

1. Bankov S. E., Kurushin A. A., Razevig V. D. *Analiz i optimizatsiya trekhmernykh SVCh struktur s pomoshch'yu HFSS* [Analysis and Optimization of Three-Dimensional Microwave Structures Using HFSS]. Moscow, Solon-Press, 2005, 285 p. (In Russ.)
2. Bankov S. E., Kurushin A. A. *Analiz i optimizatsiya SVCh-struktur s pomoshch'yu HFSS* [Analysis and Optimization of Microwave Structures Using HFSS]. Ed. by S. E. Bankova 2nd ed. Moscow, Solon-Press, 2004, 216 p. (In Russ.)
3. Razevig V. D., Potapov Yu. V., Kurushin A. A. *Proektirovanie SVCh ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office* [Designing Microwave Devices Using Microwave Office]. Moscow, Solon-Press, 2003, 496 p. (In Russ.)
4. Ivanov A. A., Mironenko, I. G., Karmanenko S. F., Semenov A. A., Nazarov I. A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroystva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* [Ferroelectric Films and Devices at Ultra- and Ex-

tremely High Frequencies]. St Petersburg, Elmore, 2007, 162 p. (In Russ.)

5. Mironenko I. G., Ivanov A. A. *Elektromagnitnye polya i volny* [Electromagnetic Fields and Waves]. St Petersburg, izd-vo SPbGETU "LETI", 2021, 169 p. (In Russ.)

6. Volman V. I., Pimenov Yu. V. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics]. Moscow, Svyaz, 1971, 487 p. (In Russ.)

7. Egorov Yu. V. *Chastichno zapolnennye pryamougol'nye volnovody* [Partially Filled Rectangular Waveguides]. Moscow, Soviet Radio, 1967, 216 p. (In Russ.)

8. Lewin L. *Theory of Waveguides*. London, Newnes-Butterworths, 1975, 311 p.

9. Grinev A. Y., Gigolo A. I. *Matematicheskie osnovy i metody resheniya zadach elektrodinamiki: uchebnoe posobie dlya studentov po spetsial'nostyam "Radiotekhnika" i "Radioelektronnye sistemy i komplekсы"* [Mathematical foundations and methods for solving problems of electrodynamics: a textbook for students in the specialties "Radio Engineering" and "Radioelectronic systems and complexes"]. Moscow, Radio Engineering, 2015, 214 p. (In Russ.)

10. Grinev A. Yu. *Chislennye metody resheniya prikladnykh zadach elektrodinamik* [Numerical methods for

solving applied problems of electrodynamics. Textbook]. Moscow, Radio engineering, 2012, 336 p. (In Russ.)

11. Schäfer M. *Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods*. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 321 p.

12. Marchuk G. I. *Metody vychislitel'noi matematiki* [Methods of Computational Mathematics]. Moscow, Nauka, 1980, 536 p. (In Russ.)

13. Gabriel'yan D. D., Zargano G. F., Zvezdina M. Yu., Zemlyakov V. V., Kobrin K. V., Labun'ko O. S., Manuilov M. B., Sinyavskii G. P. *Vychislitel'nye metody prikladnoi elektrodinamiki* [Computational Methods of Applied Electrodynamics]. Moscow, Radio Engineering, 2009, 159 p. (In Russ.)

14. Fairweather G. F., Rizzo J., Shippy D. J., Wu Y. S. On the Numerical Solution of Two- Dimensional Potential Problems by an Improved Boundary Integral Equations Method. *J. Computational Physics*. 1979, vol. 31, pp. 96–112.

15. Kurosh A. G. *Kurs vysshei algebrы* [Course of higher algebra]. Moscow, Science publishing house. The main editorial office of the Physical and mathematical literature, 1968, 431 p. (In Russ.)

Information about the authors

Igor G. Mironenko, Dr Sci. (Eng.) (1979), Professor (1981) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 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: eltech-mit-mig@gmail.com

Sergey S. Sokolov, Dr Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995) of the Department of Microradioelectronics and Radio Equipment Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 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: sovet@etu.ru

Arkady A. Ivanov, Dr Sci. (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

Синтез молекулярным наплавлением и исследование наноструктурированных оксидных слоев в высокоаспектных подложках

А. П. Барабан¹, В. А. Дмитриев¹, А. В. Дрозд^{2✉}, В. А. Мошников²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉adrozd93@mail.ru

Аннотация

Введение. Твердотельные электронные умножители (ТЭУ) в матричном исполнении, известные как микроканальные пластины (МКП), являются неотъемлемой частью современной электроники. В связи с развитием технологии молекулярного наплавления (МН) появилась возможность ее применения для управления и улучшения характеристик ТЭУ нанесением тонких слоев внутри каналов этих структур.

Цель работы. Изучение возможности нанесения тонких слоев внутри поверхности каналов ТЭУ МН с целью повышения коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) для улучшения эксплуатационных характеристик структур.

Материалы и методы. В работе был применен метод МН для нанесения нанометровых пленок оксидов магния и алюминия внутри каналов ТЭУ. Состав и структура слоев исследовались с помощью растровой электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, анализа вторичной электронной эмиссии, атомной силовой микроскопии.

Результаты. Были синтезированы тонкие пленки оксида алюминия и оксида магния внутри микронных каналов ТЭУ, показана высокая равномерность слоев по всей длине каналов. Толщина слоев варьировалась в диапазоне от 2 до 30 нм. Получены слои с улучшенными эмиссионными и защитными характеристиками. Проведены сравнительные испытания контрольных образцов МКП, содержащих синтезированные пленки.

Заключение. Показана перспективность нанесения эмиссионных слоев внутри каналов ТЭУ. Структуры с высоким аспектным отношением являются перспективным объектом для применения технологии МН. Создание наноконпозиционных структур на основе МКП открывает возможность принципиального совершенствования технологии производства материалов и приборов оптико-электронной техники. Проведены экспериментальные исследования структур МКП, содержащих слои оксида алюминия, полученные технологией МН, для регистрации столкновения пучков (FBVC) для работы в детекторах на ускорительном комплексе НИКА. Показано, что после нанесения в каналах тестируемых образцов МКП пленки Al_2O_3 толщиной 3.0 нм амплитуда сигнала возросла в 1.5 раза, а для образцов с толщиной пленки 10 нм амплитуда увеличилась почти в 2.5 раза.

Ключевые слова: вторичная электронная эмиссия, молекулярное наплавление, твердотельные электронные умножители, микроканальные пластины, оксид алюминия, оксид магния

Для цитирования: Синтез молекулярным наплавлением и исследование наноструктурированных оксидных слоев в высокоаспектных подложках / А. П. Барабан, В. А. Дмитриев, А. В. Дрозд, В. А. Мошников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 61–71. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-61-71

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ "Междисциплинарный центр по направлению нанотехнологии", "Инновационные технологии композитных наноматериалов".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.06.2024; принята к публикации после рецензирования 12.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Molecular Layering Synthesis and Investigation of Nanostructured Oxide Layers in High Aspect Ratio Substrates

Aleksandr P. Baraban¹, Valentin A. Dmitriev¹, Arsenii V. Drozd^{2✉}, Vyacheslav A. Moshnikov²

¹Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ adrozd93@mail.ru

Abstract

Introduction. Solid-state electron multipliers (EMs) in matrix design, referred to as microchannel plates (MCPs), are an integral part of modern electronics. Recent progress in the field of molecular layering (ML) technology has offered an opportunity to tailor and improve the characteristics of solid-state EMs by depositing thin layers inside the channels of these structures.

Aim. To study the possibility of depositing thin layers inside the surface of solid-state EM channels by ML in order to increase the secondary electron emission coefficient (SEEC) of such structures, thereby improving their performance characteristics.

Materials and methods. The ML method was used to deposit nanometer films of magnesium and aluminum oxides inside solid-state EM channels. The composition and structure of the layers were studied using scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, secondary electron emission analysis, and atomic force microscopy.

Results. Thin aluminum oxide and magnesium oxide films were synthesized inside the micron channels of solid-state EMs. The layers exhibited high uniformity along the entire length of the channels. The layer thickness varied in the range from 2 to 30 nm. Layers with improved emission and protective characteristics were obtained. Comparative tests of MCP samples containing the synthesized films were carried out.

Conclusion. Good prospects for the application of emissive layers inside solid-state EM channels were shown. Structures with a high aspect ratio are promising objects for ML application. The creation of nanocomposite structures based on MCPs opens up the fundamental possibility of improving the current technology of producing electrooptic materials and devices. The MCP structures containing aluminum oxide layers obtained by ML technology were experimentally tested to detect beam collisions (FBBC) for work in detectors at the NICA accelerator complex. Following deposition of a 3.0 nm-thick Al₂O₃ film in the channels of the tested MCP samples, the signal amplitude increased by 1.5 times. The deposition of layers with a film thickness of 10 nm resulted in a 2.5-fold increase in the amplitude.

Keywords: secondary electron emission, molecular layering, solid state electron multipliers, microchannel plates, aluminum oxide, magnesium oxide

For citation: Baraban A. P., Dmitriev V. A., Drozd A. V., Moshnikov V. A. Molecular Layering Synthesis and Investigation of Nanostructured Oxide Layers in High Aspect Ratio Substrates. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 61–71. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-61-71

Acknowledgments. The work was carried out using the equipment of the resource centers of St Petersburg State University "Interdisciplinary Center for Nanotechnology" and "Innovative Technologies of Composite Nanomaterials".

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

Submitted 26.06.2024; accepted 12.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. Высокоаспектные подложки являются основой для создания твердотельных электронных умножителей (ТЭУ), работа которых основана на вторичной электронной эмиссии [1]. Рабочие характеристики ТЭУ могут быть существенно улучшены путем дополнительного нанесения композитных слоев нанометровой толщины, обладающих эмиссионными, резистивными и

защитными свойствами, формируемыми в процессе синтеза слоев [2–4]. В качестве эмиссионных покрытий рассматриваются различные материалы, но наиболее перспективными являются оксиды магния и алюминия.

Различные способы нанесения таких слоев используются в исследовательских и практических целях, но наиболее привлекательным явля-

ется метод молекулярного наплаивания (МН), известный как Atomic Layer Deposition (ALD). Притягательность этой технологии состоит в возможности однородного нанесения сверхтонких слоев различных материалов заданного химического состава и структуры, а также многослойных, наноламинированных покрытий на поверхность подложек различной конфигурации, в том числе имеющих трехмерную форму [5–8].

Технология МН обеспечивает равномерные по толщине покрытия на поверхности образцов, содержащих тонкие каналы, поры и отверстия в субмикронном диапазоне. Это достигается путем проведения реакции функциональных групп на поверхности подложки с молекулами выбранного прекурсора в определенных, заданных условиях. В этих реакциях производится "достройка" остова-подложки слоем новых структурных единиц. Важнейшим отличительным признаком этого метода является саморегуляция процесса, состоящая в остановке роста слоя после завершения синтеза одного монослоя вещества и его возобновлении только при поступлении внешнего сигнала о продолжении процесса. Такой синтез является ступенчатым (digital), и толщина получаемых пленок зависит не от длительности проведения процесса роста, как в других методах, а от числа повторяющихся циклов. Это достигается посредством предложенного и экспериментально доказанного, принципиально нового процесса необратимой, попеременной хемосорбции, т. е. необратимой многократной химической реакции поверхности твердого тела с газообразными реагентами. Поверхность в этом процессе вступает в химическое взаимодействие с молекулами реагента, одни атомы которого достраивают остов данного твердого тела, а другие играют на ней роль функциональных групп, способных присоединять к себе новые молекулы, достраивающие остов.

В настоящее время технология МН-ALD нашла широкое применение в электронике для изготовления элементов СБИС, таких как high-K подзатворные диэлектрики и элементы структуры памяти. Одним из перспективных примеров будущего применения технологии МН в высокоаспектных объектах являются ТЭУ матричного типа, представляющие собой тонкие стеклянные диски с несколькими миллионами сквозных отверстий, каналов микронного

диаметра, внутри которых под действием поля происходит лавинное умножение электронного потока. История многолетнего развития микроканальных пластин на основе свинцово-силикатных стекол подошла к своему пределу совершенствования технологии. В связи с этим возникла потребность перехода к новым материалам и методам изготовления ТЭУ для совершенствования их рабочих характеристик.

Цель работы – экспериментально показать возможность получения однородных покрытий, обладающих повышенным коэффициентом вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и играющих роль защитного покрытия внутри каналов, и возможность улучшения таким образом характеристик ТЭУ. Для достижения поставленной цели было необходимо определить круг материалов и установить параметры технологического процесса для получения однородных покрытий внутри каналов ТЭУ.

Методика эксперимента. При формировании высококачественных слоев методом МН для каждого оксидного соединения необходима разработка технологического режима, который включает в себя выбор прекурсоров, установление температурного "окна процессов", оптимальных интервалов времени напуска прекурсоров и продувки инертным газом. При этом выбранные режимы должны обеспечивать полноту протекания реакций МН при синтезе слоев в высокоаспектных структурах типа ТЭУ, которые представляют собой сотовые структуры, образованные большим числом стеклянных каналов диаметром от единиц до десятков микрон с внутренней полупроводящей поверхностью, имеющей сопротивление от 20 до 1000 МОм (рис. 1).

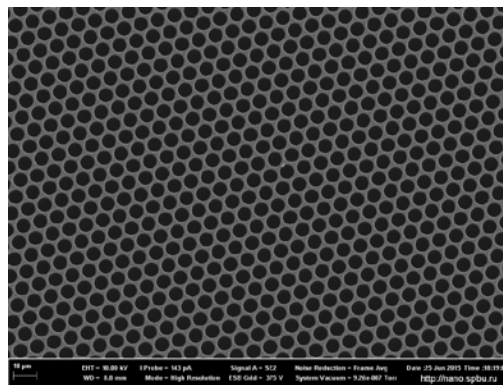


Рис. 1. Микрофотография фрагмента рабочей части МКП

Fig. 1. Microphotograph of a fragment of the MCP working part

В качестве подложек в работе использовались изолирующие (не прошедшие высокотемпературное восстановление) заготовки микроканальных пластин диаметром 25 мм. Толщина пластин составляла 300 мкм при общем числе каналов $5 \cdot 10^6$ и диаметре каждого канала 6 мкм. Аспектное отношение в таких структурах составляет 50 единиц. На рис. 1 приведена микрофотография фрагмента такой структуры, полученная с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Исследование синтеза сверхтонких слоев методом МН на поверхности высокоаспектных образцов предполагает предварительную оценку и ориентировочное задание параметров технологических режимов синтеза. Для решения этой задачи была использована модель расчета процесса синтеза для получения сплошного стехиометрического слоя синтезируемого вещества из [9], как наиболее близкая к нашим условиям. В модели рассматривался отдельный канал использованной в работе подложки в виде круглой трубки. Длина канала в расчетах составляла 300 мкм, диаметр 6 мкм, аспектное соотношение, соответственно, равно 50. В рассмотренной модели допускалась возможность использования в расчетах каналов разной формы.

Для определения условий, необходимых для покрытия канала внутри одним монослоем целевого продукта, была разработана программа определения времени синтеза в канале. Из проведенных расчетов была получена минимальная длительность импульса подачи паров воды для реакции полной гидратации поверхности канала по всей его длине, которая составила 3.1 с. Аналогично было рассчитано время подачи и для других прекурсоров, необходимое для полного покрытия поверхности канала по всей его длине монослоем синтезируемого вещества. Было установлено ориентировочно время подачи паров прекурсоров и рекомендованы температуры источников для создания необходимого давления паров прекурсоров.

Синтез слоев проводился на установке отечественного производства "Наносерф". Оксид алюминия, получаемый из паров воды и триметилалюминия (ТМА), наиболее удовлетворяет условиям процесса МН. Важным свойством является то, что ТМА очень активно взаимодействует с гидратированной поверхностью

подложки и обладает достаточным парциальным давлением паров при комнатной температуре. Для обеспечения ламинарного потока реагентов внутри каналов ТЭУ была разработана конструкция ячейки ограниченного объема для синтеза слоев на одном образце ТЭУ. Ячейка была оснащена двумя герметичными каналами для подачи паров прекурсоров и рассеивателем газового потока для создания равномерной концентрации паров прекурсоров. Синтез слоев оксида алюминия осуществлялся последовательной обработкой каналов ТЭУ парами воды и ТМА в заданной последовательности. Цикл состоял из 100 мс подачи к поверхности подложки паров воды, удаления продуктов реакции потоком сухого азота в течение 10 с, обработки парами ТМА в течение 100 мс и последующего удаления продуктов реакции в течение 10 с. Процесс синтеза проводился при постоянной температуре 200 °С. Многократным повторением приведенных циклов внутри каналов наносились слои различной толщины, определяемой числом проведенных циклов МН. Равномерность слоев определялась с помощью эллипсометрии на кремниевых полированных образцах-свидетелях, а также прямым исследованием скола канала микроканальной пластины (МКП) с помощью РЭМ. Результаты измерений показали, что за один цикл МН на поверхности подложки синтезировался слой оксида алюминия толщиной 0.13 нм, что соответствует литературным данным [10]. Оптимизация режимов синтеза слоев оксида алюминия позволила провести аналогичные исследования и при синтезе покрытий на основе оксида магния. В качестве прекурсоров для получения слоев MgO были выбраны бисэтилциклопентадиенилмагний $Mg(CpEt)_2$ и вода. Учитывая низкое давление паров $Mg(CpEt)_2$ при комнатной температуре, пришлось нагревать данный прекурсор до температуры 90 °С и увеличивать время взаимодействия паров с поверхностью подложки до 400 мс. В результате были синтезированы слои оксида магния внутри каналов ТЭУ. Эллипсометрические данные на кремниевых образцах-свидетелях показали прирост за один цикл толщины слоя MgO МН на 0.12 нм.

Анализ и оптимизация свойств наносимых слоев были проведены на модельных образцах,

в которых в качестве подложки использовался монокристаллический кремний. Выбор подложки был обоснован тем фактом, что поверхность кремния обычно содержит реальный, гидратированный оксид толщиной 1...2 нм, который с химической точки зрения довольно близок по составу поверхности каналов ТЭУ, содержащих в своей основе оксид кремния с гидроксильным покровом. Обе поверхности содержат гидроксильный покров, играющий роль функциональных групп, участвующих в процессе синтеза слоев в качестве макрореагента. Синтез слоев оксидов на кремнии проводился в широком диапазоне толщин.

Выбранные в результате предварительных экспериментов, основанных на моделировании процессов синтеза в высокоаспектных структурах, параметры синтеза оксидных слоев позволили в едином цикле получить набор модельных структур на кремниевой подложке и набор контрольных пластин на высокоаспектной подложке для дальнейших исследований.

Для измерения шероховатости поверхности синтезируемых слоев использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ-измерения проводились в полуконтактном режиме на атомно-силовом микроскопе Veeco Dimension V. Максимальный размер области сканирования составлял 1×1 мкм.

Для определения толщин нанесенных пленок методом МН использовалась спектральная эллипсометрия. Измерения синтезированных на поверхности кремния оксидных слоев проводились на установке "Эллипс 1891 САГ". Спектральный диапазон измерений 350...1000 нм.

С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе ESCALab 250 Xi был исследован химический

состав поверхностного слоя в исходных синтезированных слоях. Сначала были записаны обзорные спектры исследуемого образца в нескольких точках и была выбрана наилучшая точка по интенсивности пиков элементов. После чего были записаны обзорные и детальные спектры. Для исключения зарядки образца в процессе измерений использовалась система электронно-ионной компенсации заряда.

Для обеспечения контроля равномерности нанесения слоев методом МН внутри каналов ТЭУ была разработана специальная конструкция, помещаемая в вакуумный реактор для синтеза (рис. 2).

Внутри реакционной камеры для синтеза пленок методом МН 1, находится конструкция, которая содержит микроканальную пластину 3, установленную на держатель 2, диаметр которого меньше диаметра ТЭУ на 2 мм. Держатель установлен на подложку-индикатор 4, выполненную из пластины полированного кремния, и создает зазор от 2 до 5 мм между ТЭУ, расположенной на дне держателя, и подложкой-индикатором. Подложка-контролер 5, также выполненная из пластины полированного кремния, установлена снаружи на расстоянии 5 мм от держателя ТЭУ.

Внутрь реактора попеременно подаются пары химических прекурсоров, что приводит к послойному росту пленки внутри каналов ТЭУ. Конструкция устройства позволяет убедиться в том, что реакция прошла по всей длине канала, путем измерения на спектральном эллипсометрическом комплексе толщины пленки на поверхности образца-индикатора. Если доза подаваемых в реактор прекурсоров достаточна, то на образце-индикаторе, находящемся под ТЭУ, толщина полученной пленки будет такая же, как и толщина пленки на образце-контролере.

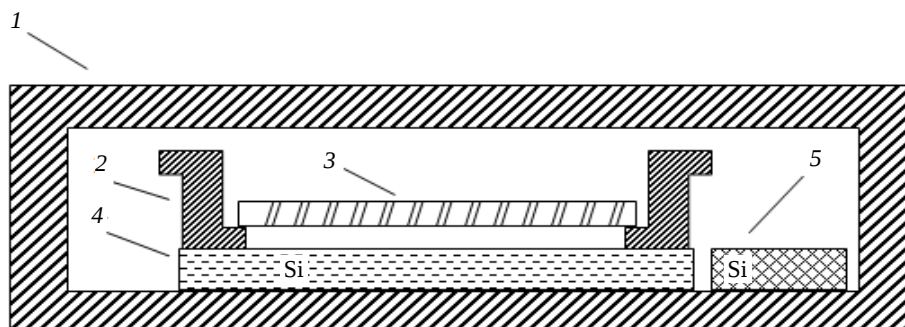


Рис. 2. Конструкция ячейки для контроля равномерности покрытия каналов ТЭУ с высоким аспектным отношением

Fig. 2. Cell design for monitoring the uniformity of covering high aspect ratio EM channels

Это свидетельствует о правильном выборе дозы подачи молекул на вход канала и обеспечение их перемещения по каналу вплоть до выхода из канала. Если толщины пленок на образцах отличаются, то это означает, что доза прекурсоров недостаточна для получения равномерного, сплошного покрытия внутри каналов МКП.

Методом контроля толщины пленки и ее состава, полученной методом МН внутри каналов ТЭУ, являлась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на установке Zeiss Supra. Недостатком данного метода является то, что для проведения измерения необходимо разрушить ТЭУ. Точность измерения с помощью СЭМ составляет порядка 10 %.

Исследования кристалличности структуры оксидов, синтезированных на кремнии, проводились с использованием электронограмм "на отражение" и рентгеновской дифрактометрии.

Экспериментальные результаты. Электронограммы "на отражение" синтезированных в диапазоне температур от 200 до 250 °С слоев оксидов алюминия и магния на кремнии указывают на отсутствие каких-либо признаков текстуры, и в первом приближении их можно считать некристаллическими.

Анализ пленок оксидов алюминия и магния ($d_{\text{ox}} = 20 \dots 100$ нм) методом АСМ показал, что разброс толщины слоя по площади образца не превышает ± 5.2 %.

Состав и стехиометрия оксидных пленок, синтезированных на кремнии при различных температурах, определялись методом РФЭС. На рис. 3 приведены спектры РФЭС сформированных при температуре 200 °С слоев оксида магния в диапазоне от 0 до 1400 эВ, которые соответствуют энергетическому уровню углерода 1s, основным уровням и оже-линиям магния и кислорода. Аналогичные спектры были получены для слоев оксида алюминия на кремнии (рис. 4).

Необходимо отметить, что сигнал C 1s в обоих случаях исчезает после удаления загрязнений с поверхности пленки, и его можно связать с неконтролируемой адсорбцией углеводородов или углекислого газа на поверхности синтезируемой пленки при переносе из реакторной камеры в камеру фотоэлектронного спектрометра. Дополнительные исследования методом оптической эмиссионной спектроско-

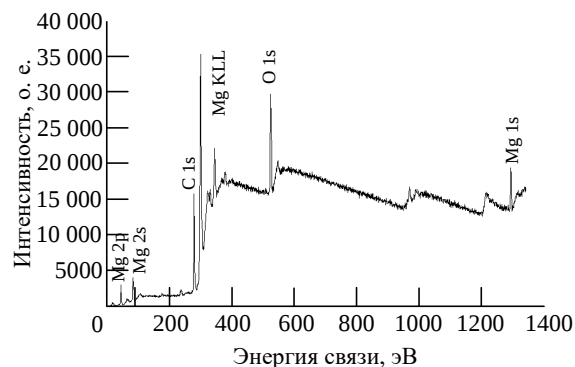


Рис. 3. Спектры РФЭС оксида магния, полученного методом МН на кремнии

Fig. 3. XPS spectra of magnesium oxide obtained by the ML method on silicon

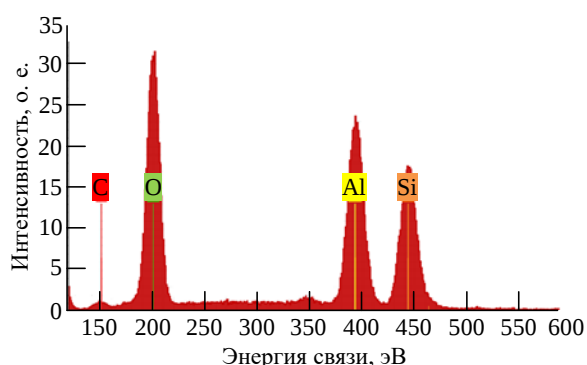


Рис. 4. Элементный состав покрытий из оксида алюминия, полученных методом МН на кремнии

Fig. 4. Elemental composition of aluminum oxide layers obtained by the ML method on silicon

рии тлеющего разряда покрытия Al_2O_3 на поверхности кремниевой пластины показали отсутствие углерода в объеме оксида. При этом кислород и алюминий в первом приближении характеризуются однородным распределением по всей толщине пленки, за исключением приповерхностного слоя (~ 3 нм), в котором отмечается уменьшение количества алюминия и увеличение кислорода, что представляется вполне приемлемым.

Наличие в обоих спектрах (рис. 3 и 4) только основных уровней металлов (магния, алюминия) и кислорода позволяет утверждать, что синтезированные слои являются оксидами магния и алюминия без заметных примесей.

Для контроля однородности толщины оксидных слоев, полученных методом МН внутри каналов ТЭУ, были нанесены пленки толщиной 30...40 нм и на сколе образца выполнены измерения толщины пленки и ее равномерности методом СЭМ. На рис. 5 приведены изображения

Fig. 5. Image of a cleavage of a EM channel with a deposited Al_2O_3 layer obtained by scanning electron microscopy at three equidistant points along the length of the channel

Таким образом, в соответствии с целью данной работы были выбраны параметры синтеза и экспериментально показана возможность

Достигнутый результат может быть использован как для улучшения характеристик существующих стандартных ТЭУ, так и для создания ТЭУ нового поколения [11], в которых на инертную высокоаспектную подложку последовательно будут наноситься резистивный и эмиссионный слой.

Проведенные исследования позволили продемонстрировать возможности метода МН для улучшения характеристик ТЭУ типа МКП. Удачный пример использования предложенного авторами подхода приведен в [12]. Проверка эффективности применения метода МН для улучшения параметров МКП была осуществлена авторами статьи на быстром мониторе столкновения пучков (FBBC) для работы в детекторах, строящихся на ускорительном комплексе NICA. Задачи FBBC состоят в оценке таких характеристик столкновений, как множественность, центральность, момент времени, в которое произошло событие. Важной характеристикой такого детектора является коэффициент усиления и, соответственно, большая амплитуда выходного сигнала. В работе было показано, что после нанесения в каналах тестируемых образцов МКП пленки Al_2O_3 толщиной 3.0 нм амплитуда сигнала возросла в 1.5 раза, а для образцов с толщиной пленки 10 нм амплитуда увеличилась почти в 2.5 раза.

Оксид магния обладает большим значением КВЭЭ, однако характеризуется отсутствием стабильности свойств в атмосфере, ввиду химической активности. С учетом того, что глубина выхода вторичных электронов из оксида магния составляет порядка 30 нм [13–15], авторами статьи был предложен и реализован вариант наноламинированного покрытия в виде последовательно нанесенных внутри каналов МКП слоев оксида магния толщиной 30 нм и оксида алюминия толщиной 2 нм. Слой оксида алюминия выступает в данном случае в качестве защитного слоя, и его наличие не приводит к заметному уменьшению КВЭЭ, характерному для оксида магния.

Закключение. На основе проведенных исследований были выбраны оптимальные режимы синтеза методом МН оксидных слоев алюминия и магния, экспериментально показана возможность формирования однородных слоев по всей длине канала в высокоаспектных структурах с аспектным отношением вплоть до 50. Учитывая высокий КВЭЭ, данные слои могут быть с успехом использованы для улучшения усилительных характеристик МКП, а также при разработке новых электронных умножителей на основе высокоаспектных структур на инертной (вплоть до полимерной) подложке.

Авторский вклад

Барабан Александр Петрович – постановка задачи; анализ экспериментальных данных; разработка оригинальной ячейки для синтеза.

Дмитриев Валентин Александрович – определение элементного состава образцов; получение изображений образцов с помощью растровой электронной микроскопии.

Дрозд Арсений Викторович – синтез образцов; измерение коэффициента вторичной электронной эмиссии; разработка оригинальной ячейки для синтеза.

Мошников Вячеслав Алексеевич – анализ экспериментальных данных; рекомендации по АСМ-измерениям.

Author's contribution

Alexander P. Baraban, problem statement; analysis of experimental results; design of the original synthesis cell.

Vladimir A. Dmitriev, determination of the elemental composition of samples; obtaining images of samples using scanning electron microscopy.

Arsenii V. Drozd, sample synthesis; measurement of the secondary electron emission coefficient; design of the original synthesis cell.

Vyacheslav A. Moshnikov, analysis of experimental results; recommendations for AFM measurements.

Список литературы

1. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.
2. Lifetime of MCP-PMT / N. Kishimoto, M. Nagamine, K. Inami, Y. Enari, T. Ohshima // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2006. Vol. 564, iss. 1. P. 204–211. doi: 10.1016/j.nima.2006.04.089
3. Mori T. Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT // Acta Physica Polonica B. 2011. Vol. 4, iss. 1. P. 101–106. doi: 10.5506/APhysPolBSupp.4.101
4. Lifetime-extended MCP-PMT / T. Jinno, T. Mori, T. Ohshima, Y. Arita, K. Inami, T. Ihara, H. Nishizawa, T. Sasaki // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2011. Vol. 629, iss. 1. P. 111–117. doi: 10.1016/j.nima.2010.10.145
5. Stabilization of ambient sensitive atomic layer deposited lanthanum aluminates by annealing and in situ capping / J. Swerts, S. Gielis, G. Vereecke, A. Hardy, D. Dewulf, C. Adelmann, M. K. V. Bael, S. V. Elshocht // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98. P. 102904. doi: 10.1063/1.3557501

6. Application of titanium materials to vacuum chambers and components / H. Kurisu, K. Ishizawa, S. Yamamoto, M. Hesaka, Y. Saito // J. of Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 100. P. 092002. doi: 10.1088/1742-6596/100/9/092002

7. Hydrogen outgassing from titanium-modified layers with various surface treatments / Y. Mizuno, A. Tanaka, K. Takahiro, T. Takano, Y. Yamauchi, T. Okada, S. Yamaguchi, T. Homma // J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001. Vol. 19. P. 2571–2577. doi: 10.1116/1.1392396

8. From V. B. Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition / A. A. Malygin, V. E. Drozd, A. A. Mal'kov, V. M. Smirnov // Chem. Vap. Deposition. 2015. Vol. 21 iss. 10–12. P. 216–240. doi: 10.1002/cvde.201502013

9. A Kinetic Model for Step Coverage by Atomic Layer Deposition in Narrow Holes or Trenches / R. G. Gordon, D. Hausmann, E. Kim, J. Shepard //

Chemical Vapor Deposition. 2003. Vol. 9, iss. 2. P. 73–78. doi: 10.1002/cvde.200390005

10. Puurunen R. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum/water process // J. of Applied Physics. 2005. Vol. 97. P. 121301. doi: 10.1063/1.1940727

11. Shu Xia Tao, Hong Wah Chan, Harry van der Graaf. Secondary Electron Emission Materials for Transmission Dynodes in Novel Photomultipliers: a Review // Materials. 2016. Vol. 9, iss. 12. P. 1017. doi: 10.3390/ma9121017

12. Микроканальные пластины с тонкими слоями Al_2O_3 для FBBC-мониторинга / А. В. Дрозд, Н. И. Калинин, Ф. Ф. Валиев, Г. А. Феофилов, А. М. Яфясов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2023. Т. 54, вып. 4. С. 855–859.

13. Теория термоэмиссионных и вторично-эмиссионных свойств палладий-бариевых катодов электровакуумных сверхвысокочастотных приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, С. О. Москаленко, А. В. Шуманов // Журн. технической физики. 2020. Т. 90, вып. 2. С. 330–337. doi: 10.21883/JTF.2020.02.48829.195-19

14. Upgraded Cherenkov time-of-flight detector for the AFP project / L. Nozka, G. Avoni, E. Banas, E. Brandt // Optics Express. 2023. Vol. 31, № 3. P. 3998–4014. doi: 10.1364/OE.480624

15. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended lifetime MCP-PMTs: Characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates in a sealed photomultiplier tube // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013. Vol. 732. P. 388–391. doi: 10.1016/j.nima.2013.07.023

Информация об авторах

Барабан Александр Петрович – доктор физико-математических наук (1991), профессор (2008), заведующий кафедрой электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – неравновесные электронные процессы и электрофизические свойства слоистых структур на основе структур полупроводник–диэлектрик; процессы взаимодействия электронной и атомной подсистем твердого тела при их возбуждении ионами, электронами, ионизирующим облучением; люминесцентные методы для исследования слоистых структур на основе полупроводников и исследования межфазовой границы диэлектрик–диэлектрик; физико-химические свойства слоистых структур на основе полупроводников, формируемых на принципах молекулярного наслаивания, с целью создания на их основе функциональных элементов двойного применения.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, корп. М, Петергоф, 198504, Россия

E-mail: a.baraban@spbu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8745-7019>

Дмитриев Валентин Александрович – кандидат физико-математических наук (2005), старший научный сотрудник кафедры электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – неравновесные электронные процессы и электрофизические свойства слоистых структур на основе структур полупроводник–диэлектрик; процессы взаимодействия электронной и атомной подсистем твердого тела при их возбуждении ионами, электронами, ионизирующим облучением; люминесцентные методы для исследования слоистых структур на основе полупроводников и исследования межфазовой границы диэлектрик–диэлектрик.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, корп. М, Петергоф, 198504, Россия

E-mail: v.dmitriev@spbu.ru

Дрозд Арсений Викторович – аспирант, младший научный сотрудник инженерингового центра микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – наноструктуры; технология молекулярного наслаивания; физика конденсированного состояния; физика полупроводников.

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

E-mail: adroz93@mail.ru

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук (1997), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – коллоидные квантовые точки; золь-гель-технология; иерархические пористые материалы; биосенсоры; солнечные элементы, фотокатализаторы.

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

E-mail: vamosnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

References

1. Bronshtein I. M., Fraiman B. S. Secondary Electron Emission. Moscow, Science, 1969, 408 p.
2. Kishimoto N., Nagamine M., Inami K., Enari Y., Ohshima T. Lifetime of MCP-PMT. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2006, vol. 564, iss. 1, pp. 204–211. doi: 10.1016/j.nima.2006.04.089
3. Mori T. Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT. Acta Physica Polonica B. 2011, vol. 4, iss. 1, pp. 101–106. doi: 10.5506/APhysPolBSupp.4.101
4. Jinno T., Mori T., Ohshima T., Arita Y., Inami K., Ihara T., Nishizawa H., Sasaki T. Lifetime-extended MCP-PMT. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2011, vol. 629, iss. 1, pp. 111–117. doi: 10.1016/j.nima.2010.10.145
5. Swerts J., Gielis S., Vereecke G., Hardy A., Dewulf D., Adelmann C., Bael M. K. V., Elshocht S. V. Stabilization of Ambient Sensitive Atomic Layer Deposited Lanthanum Aluminates by Annealing and in Situ Capping. Applied Physics Letters. 2011, vol. 98, p. 102904. doi: 10.1063/1.3557501
6. Kurisu H., Ishizawa K., Yamamoto S., Hesaka M., Saito Y. Application of Titanium Materials to Vacuum Chambers and Components. J. of Physics: Conf. Series. 2008, vol. 100, p. 092002. doi: 10.1088/1742-6596/100/9/092002
7. Mizuno Y., Tanaka A., Takahiro K., Takano T., Yamauchi Y., Okada T., Yamaguchi S., Homma T. Hydrogen Outgassing from Titanium-Modified Layers with Various Surface Treatments. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001, vol. 19, pp. 2571–2577. doi: 10.1116/1.1392396
8. Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., Smirnov V. M. From V. B. Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition. Chem. Vap. Deposition. 2015, vol. 21, iss. 10–12, pp. 216–240. doi: 10.1002/cvde.201502013
9. Gordon R. G., Hausmann D., Kim E., Shepard J. A Kinetic Model for Step Coverage by Atomic Layer Deposition in Narrow Holes or Trenches. Chemical Vapor Deposition. 2003, vol. 9, iss. 2, pp. 73–78. doi: 10.1002/cvde.200390005
10. Puurunen R. Surface Chemistry of Atomic Layer Deposition: a Case Study for the Trimethylaluminum/Water Process. J. of Applied Physics. 2005, vol. 97, p. 121301. doi: 10.1063/1.1940727
11. Shu Xia Tao, Hong Wah Chan, Harry van der Graaf. Secondary Electron Emission Materials for Transmission Dynodes in Novel Photomultipliers: a Review. Materials. 2016, vol. 9, iss. 12, p. 1017. doi: 10.3390/ma9121017
12. Drozd A. V., Kalinichenko N. I., Makarov N. A., Valiev F. F., Feofilov G. A., Yafyasov A. M. Microchannel Plates with Thin Al_2O_3 Layers for an FBBC Monitor. Physics of Particles and Nuclei. 2023, vol. 54, pp. 717–719. doi: 10.1134/S1063779623040147
13. Kapustin V. I., Lee I. P., Moskalenko S. O., Shumanov A. V. Theory of Thermionic and Secondary Emission Properties of Palladium-Barium Cathodes of Microwave Electrovacuum Devices. Technical Physics. 2020, vol. 65, pp. 317–323. doi: 10.1134/S1063784220020073
14. Nozka L., Avoni G., Banas E., Brandt E. Upgraded Cherenkov Time-of-Flight Detector for the AFP Project. Optics Express. 2023, vol. 31, no. 3, pp. 3998–4014. doi: 10.1364/OE.480624
15. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended Lifetime MCP-PMTs: Characterisation and Lifetime Measurements of ALD Coated Microchannel Plates in a Sealed Photomultiplier Tube. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013, vol. 732, pp. 388–391. doi: 10.1016/j.nima.2013.07.023

Information about the authors

Alexander P. Baraban, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1991), Professor (2008), Head of the Department of Solid State Electronics of Saint Petersburg State University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: nonequilibrium electronic processes and electrical properties of layered structures based on semiconductor-insulator structures; processes of interaction between the electronic and atomic subsystems of a solid body when they are excited by ions, electrons, and ionizing radiation; luminescent methods for studying layered structures based on semiconductors and studying the dielectric-dielectric interface; physicochemical properties of layered structures based on semiconductors, formed on the principles of molecular layering, with the aim of creating dual-use functional elements on their basis.

Address: Saint Petersburg State University, 1, bldg. M, Ulyanovskaya St., Peterhof 198504, Russia

E-mail: a.baraban@spbu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8745-7019>

Vladimir A. Dmitriev, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2005), Senior Researcher of Department of Solid State Electronics of Saint Petersburg State University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: nonequilibrium electronic processes and electrical properties of layered structures based on semiconductor-insulator structures; processes of interaction between the electronic and atomic subsystems of a solid body when they are excited by ions, electrons, and ionizing radiation; luminescent methods for studying layered structures based on semiconductors and studying the dielectric-dielectric interface.

Address: Saint Petersburg State University, 1, bldg. M, Ulyanovskaya St., Peterhof 198504, Russia

E-mail: v.dmitriev@spbu.ru

Arsenii V. Drozd, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Engineering Center for Microtechnology and Diagnostics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: nanostructures; molecular layering technology; condensed matter physics; physics of semiconductors.

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

E-mail: adrozd93@mail.ru

Vyacheslav A. Moshnikov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1997), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: colloidal quantum dots; sol-gel technology; hierarchical porous materials; biosensors; solar cells; photocatalysts.

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

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

Исследование влияния ширины барьера на рабочее напряжение QWIP

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

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. Спектр применения инфракрасных фотодетекторов с квантовыми ямами (QWIP) очень широк. Такие фотодетекторы являются достаточно востребованными на рынке, поэтому очень важно глубокое понимание принципа их работы.

Цель работы. Исследование влияния потенциального барьера AlGaAs, окружающего квантовые ямы GaAs, на значение рабочего напряжения смещения QWIP длинноволновой области спектра (8...10 мкм).

Материалы и методы. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы QWIP на основе системы полупроводниковых материалов GaAs/AlGaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Фоточувствительная (активная) область структур содержала 50 квантовых ям GaAs толщиной 50 Å, разделенных барьерами AlGaAs. Квантовые ямы легировались *in situ* донорной примесью – кремнием. Длина волны максимума спектральной чувствительности всех образцов находилась в диапазоне 8...9 мкм. Варьируемым параметром являлась ширина барьера. После прохождения технологического маршрута планарной модификации на всех структурах были сняты вольт-амперные характеристики.

Результаты. Выявлено, что уменьшение толщины барьера способно сместить пик фоточувствительности в область меньших напряжений смещения при незначительном увеличении силы темнового тока.

Заключение. Исследование влияния значения приложенного напряжения смещения представляет интерес не только с научной точки зрения – результаты помогут лучше понять поведение темнового тока в QWIP, а также позволят управлять максимумом токовой чувствительности, смещая ее в область требуемых рабочих напряжений мультиплексоров.

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

Для цитирования: 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

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; принята к публикации после рецензирования 17.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024

Influence of Barrier Width on QWIP Operating Voltage

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

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²JSC "Svetlana-Rost", St Petersburg, Russia

✉ Lana.stoliarowa@yandex.ru

Abstract

Introduction. Quantum well infrared photodetectors (QWIP) are characterized by a wide application range. A large market demand for such photodetectors determines the importance of elucidating the principle of their operation.

Aim. To carry out a research study into the influence of the AlGaAs potential barrier surrounding GaAs quantum wells on the QWIP operating bias voltage in the long-wavelength region of the spectrum (8...10 μm).

Materials and methods. QWIP experimental samples were manufactured based on the GaAs/AlGaAs semiconductor material system using molecular beam epitaxy. The photosensitive (active) region of the structures contained 50 GaAs quantum wells with a thickness of 50 Å thick separated by AlGaAs barriers. Quantum wells were doped in situ with silicon as a donor impurity. The wavelength of the maximum spectral sensitivity of all samples ranged within 8...9 μm . The barrier width was the variable parameter. After passing the planar modification process route, the current–voltage characteristics were measured in all structures.

Results. Reduction in the barrier thickness is capable of shifting the peak of photosensitivity towards the region of lower bias voltages with a slight increase in the dark current values.

Conclusion. The study of the influence of the applied bias voltage presents both scientific and practical interest. On the one hand, the results improve the current understanding of the behavior of the dark current in QWIP. On the other, they provide the possibility of managing the maximum current sensitivity, shifting it towards the region of the required operating voltages of the multiplexers.

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

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

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.

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

Submitted 05.04.2024; accepted 17.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Матричные инфракрасные фотодетекторы с квантовыми ямами (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) в последнее время привлекают все больше внимание из-за своего потенциального применения в качестве относительно недорогих и высокопроизводительных приборов приема изображения в инфракрасном (ИК) диапазоне электромагнитного спектра. QWIP-камеры длинноволнового диапазона (8...14 мкм) позволяют получать изображение в условиях плохой видимости, например сквозь облачность, дым или дождь [1]. В ИК-диапазоне можно увидеть текущую горячую вулканическую лавовую трубу, скрытую

под землей. Особенно важным может быть применение QWIP-камер в медицине, поскольку с их помощью, например, можно распознавать раковые клетки [1].

Двумя важнейшими параметрами QWIP-прибора являются темновой ток и токовая чувствительность в максимуме спектра фоточувствительности. Понимание их поведения в зависимости от различных факторов очень важно при проектировании дизайна структуры и для оптимизации QWIP.

Фоточувствительность определяет способность детектора поглощать падающее на него электромагнитное излучение – по спектру фо-

точувствительности можно определить длину волны, на которой поглощение максимально.

Токовая чувствительность, определяемая на длине волны максимума фоточувствительности, характеризует способность QWIP преобразовывать падающее излучение в электрический сигнал. В настоящий момент на российских предприятиях, занимающихся разработкой QWIP, удовлетворительным показателем является значение статической токовой чувствительности в максимуме спектра фоточувствительности от 0.15 А/Вт [2]. При этом непрерывно ведутся работы по поиску способов увеличения чувствительности фотодетекторов. Одним из распространенных способов является увеличение концентрации легирующей примеси в квантовых ямах [3], однако этот метод имеет существенный недостаток. Дело в том, что для детектирования излучения в ИК-области применяются полупроводниковые материалы с достаточно узкой запрещенной зоной, поэтому необходимым условием для успешной работы QWIP, как и для большинства других ИК-фотодетекторов, является охлаждение до низких (77 К и ниже) температур. В противоположном случае тепловой шум в устройстве будет слишком велик, а спектральная чувствительность низкой. При этих условиях чем выше уровень легирования квантовых ям,

тем больше темновой ток, протекающий через QWIP [4]. В свою очередь, темновой ток обуславливает шум и диктует рабочую температуру фотодетектора [5]. Темновой ток – это ток, протекающий через структуру независимо от того, падают на активную область фотоны или нет.

Условием работы QWIP является приложение внешнего электрического поля к активной области, чтобы добиться наклона энергетических зон и обеспечить постоянный ток через структуру. При приложении напряжения смещения темновой ток является неизбежным [6]. Таким образом, одной из важнейших задач при оптимизации параметров структуры QWIP является минимизация темнового тока.

К настоящему времени разработано несколько аналитических и численных моделей для оценки возможности управления темновым током при различных параметрах QWIP. Обзор некоторых из них представлен в [7]. Однако практика показывает, что они не могут учесть все особенности сложной полупроводниковой гетероструктуры с множественными квантовыми ямами, которой являются QWIP, и достоверно предсказать поведение темнового тока в различных условиях.

Рассмотрим подробнее некоторые из существующих механизмов возникновения темнового тока (рис. 1).

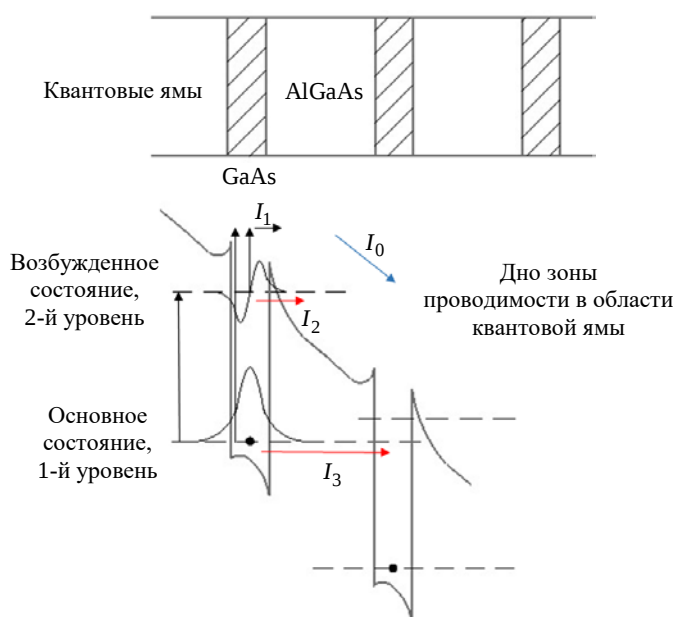


Рис. 1. Схематичное изображение активной области и фрагмента дна зоны проводимости QWIP-структуры с двумя квантово-размерными энергетическими уровнями при приложении внешнего электрического поля

Fig. 1. Schematic representation of the active region and a fragment of the conduction band bottom of a QWIP structure with two quantum-sized energy levels under an external electric field

При приложении внешнего электрического поля энергетические зоны структуры искривляются – появляется наклон. Через структуру протекает ток, который в нулевом приближении (без учета влияния квантовых ям) можно определить согласно закону Ома следующим образом:

$$I_0 = \frac{U}{R},$$

где I_0 – базовый ток, протекающий через гетероструктуру при приложении внешнего электрического поля; U – приложенное напряжение смещения; R – сопротивление гетероструктуры.

Квантовые ямы QWIP стараются выращивать таким образом, чтобы внутри существовало 2 энергетических уровня. В связи с этим дальнейшее рассмотрение будет строиться из предположения, что в энергетической структуре QWIP первый (основной) уровень располагается у дна квантовой ямы, а второй (возбужденный) – близко к вершине энергетического барьера в отсутствие приложения внешнего электрического поля.

Основная электронная плотность сосредоточена на первом (основном) уровне. Под воздействием ИК-излучения электрон может перейти с основного уровня на возбужденный уровень или выйти из квантовой ямы (рис. 1, I_1) в свободную зону. В таком случае добавочный ток возникает по механизму термоэлектронной эмиссии. Эта составляющая темнового тока очень сильно зависит от рабочей температуры фотодетектора и преобладает на относительно высоких температурах [4].

Из возбужденного состояния электрон может также туннелировать через вершину потенциального барьера в континуум за счет того, что зоны изгибаются при приложении внешнего электрического поля (рис. 1, I_2) [8, 9]. Этот вклад темнового тока в основном определяется резкостью гетерограниц при росте эпитаксиальных слоев GaAs на AlGaAs и AlGaAs на GaAs и значением напряженности электрического поля вблизи квантовой ямы.

Другой механизм квантово-механического туннелирования может возникнуть вследствие того, что наблюдается некоторое перекрытие волновых функций электронов на основных (низших) уровнях соседних квантовых ям (рис. 2). Темновой ток, протекающий за счет

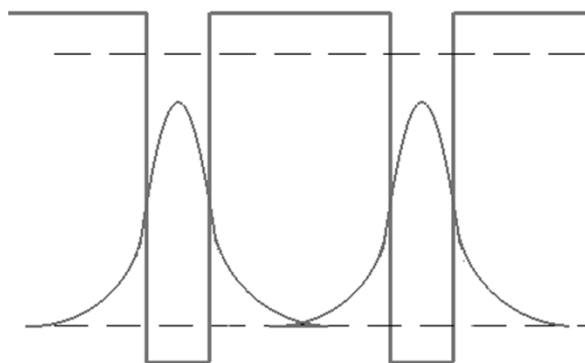


Рис. 2. Схематичное изображение перекрытия волновых функций электронов на основном уровне в структуре с несколькими квантовыми ямами

Fig. 2. Schematic representation of the overlap of electron wave functions at a level with several quantum wells

данного типа туннелирования, начинает доминировать при очень низких температурах, когда вклады темновых токов, вызванных термоэлектронной эмиссией и туннелированием с верхнего уровня квантовых ям, минимальны. Он практически не зависит от рабочей температуры, и в литературе показано, что его можно устранить, если корректно выбрать толщину барьерного слоя, разделяющего квантовые ямы [7].

Таким образом, протекающий через фотодетектор темновой ток складывается из нескольких составляющих:

$$I_{\text{темн}} = I_0 + I_1 + I_2 + I_3, \quad (1)$$

где $I_{\text{темн}}$ – суммарный протекающий через фотодетектор темновой ток; I_1 – ток, обусловленный переходом электронов в зону проводимости под воздействием фотонов с основного и возбужденного уровней; I_2 – ток, обусловленный квантово-механическим туннелированием через барьер из возбужденного состояния; I_3 – ток, обусловленный квантово-механическим туннелированием через барьер из основного состояния.

Сила протекающего через фотодетектор темнового тока существенно зависит от множества факторов, таких, как ширина квантовой ямы [10], уровень и профиль ее легирования [3, 11], а также высота барьера, его форма и степень легирования [4, 12–14]. Влияние большинства из них достаточно подробно изучено в литературе. При этом детальных исследований влияния ширины барьера на рабочие характеристики готовых изделий QWIP не проводилось.

Очевидно, что барьер должен быть достаточно толстым, чтобы предотвратить последовательное туннелирование между соседними квантовыми ямами. В [15] показано, что при ширине квантовой ямы около 5 нм туннелирование пренебрежимо мало при толщине барьеров более 20 нм.

При этом сильное увеличение ширины барьера не только экономически нецелесообразно, но и не приводит к ощутимому уменьшению темнового тока. Поэтому в большинстве публикаций ограничиваются ростом барьера до толщины 50 нм, хотя встречаются и данные об образцах с более толстыми барьерами [16].

Стремление к росту тонких барьерных слоев обусловлено кроме всего прочего экономическими соображениями, способствуя уменьшению времени ростового процесса. В перспективе серийного производства это позволяет увеличить выход продукции. Кроме того, увеличение количества квантовых ям за счет сокращения толщины барьеров при сохранении общей толщины активной области неизменной может привести к более высокой доле поглощенного излучения [4] и, соответственно, более высокой чувствительности прибора.

После того как технологический процесс изготовления QWIP завершен, рабочие матрицы монтируют на интегральные микросхемы (мультиплексоры) методом flip-chip. Это позволяет считывать сигнал, поступающий с пикселей фоточувствительной матрицы, преобразовать его для дальнейшей обработки и вывести к пользователю. Востребованность фотоприемных матриц на рынке, в числе прочего, определяется наличием конкретных мультиплексоров, на которые можно будет осуществить их последующий монтаж. Мультиплексоры различаются по рабочему напряжению, поэтому очень важно не только обеспечить определенное значение максимума токовой чувствительности, но и иметь возможность управлять напряжением, при приложении которого этот максимум достигается.

Целью описываемой работы являлось изучение степени влияния ширины барьерных слоев активной области QWIP-структуры на рабочие характеристики тестовых фотоприемников, а именно – на вид вольт-амперных характеристик (ВАХ) и на спектры статической токовой чувствительности в максимуме спектра фоточувствительности.

Материалы и методы исследования. Для проведения эксперимента было изготовлено несколько образцов QWIP на основе системы полупроводниковых материалов GaAs/AlGaAs. Эпитаксиальные слои выращивались на отечественной автоматизированной установке молекулярно-пучковой эпитаксии производства ЗАО "НТО" STE35. Фоточувствительная (активная) область структур содержала 50 квантовых ям GaAs толщиной 50 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$), разделенных барьерами AlGaAs. Квантовые ямы легировались in situ донорной примесью – кремнием. Ширина барьера являлась варьируемым параметром. Длина волны максимума спектральной чувствительности всех образцов находилась в диапазоне 8...9 мкм. Ключевые данные о структурном составе образцов представлены в таблице.

После ростового процесса эпитаксиальные структуры прошли планарную постобработку для формирования непосредственно образцов QWIP, а именно: в верхнем контактном слое с помощью плазмохимического травления GaAs были сформированы дифракционная решетка, омические контакты на основе сплава Ni, Ge, Au, а на тестовые фотоприемники были напылены индиевые контакты высотой 5...7 мкм.

По окончании технологического процесса тестовые фотоприемники были смонтированы методом flip-chip с подкристалльными платами и помещены в заливной азотный оптический криостат JANIS VPF-100. При помощи аппаратно-программного комплекса Keithley 4200 были измерены ВАХ, а также построены графики зави-

Данные образцов

Sample data

Образец	Концентрация примеси в квантовой яме, см^{-3}	Ширина барьера, Å	Ширина квантовой ямы, Å
А	$9 \cdot 10^{17}$	450	50
В	$9 \cdot 10^{17}$	300	50

симости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения для всех образцов.

Для того чтобы построить графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения, необходимо осуществить следующие действия:

1. Снять спектр fotocувствительности образцов, определить значение длины волны, на которой поглощение падающего электромагнитного излучения максимально.

2. Измерить ВАХ при облучении тестового фотоприемника источником ИК-излучения и ВАХ при закрытом источнике ИК-излучения.

3. Рассчитать значение токовой чувствительности в максимуме спектра fotocувствительности по формуле

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

где S – значение токовой чувствительности; ΔI – разность между протекающими через тестовый фотоприемник токами при облучении его ИК-излучением и при отсутствии облучения на заданном напряжении смещения; J – плотность излучения, падающего на тестовый фотоприемник на заданной длине волны; A – площадь fotocувствительной поверхности тестового фотоприемника размерами 500×500 мкм.

Значение рабочего напряжения смещения оценивалось по построенным графикам зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения. В качестве рабочего выбиралось напряжение, на котором токовая чувствительность имела максимальное значение.

Результаты. На рис. 3 представлены измеренные и приведенные к единице спектры fotocувствительности образцов А и В. Максимум длины волны поглощения образца А соответствует 8535 нм, образца В – 8445 нм.

На рис. 4 представлены измеренные ВАХ образцов А и В. ВАХ имеет нелинейный характер – при приложении различных напряжений смещения темновой ток, рассчитанный по (1), начинает вносить вклад в общий ток, протекающий через гетероструктуру.

На рис. 5 представлены графики зависимости токовой чувствительности от приложенного напряжения смещения образцов А и В в максимуме спектров их fotocувствительности.

Рис. 4 показывает, что на обоих образцах

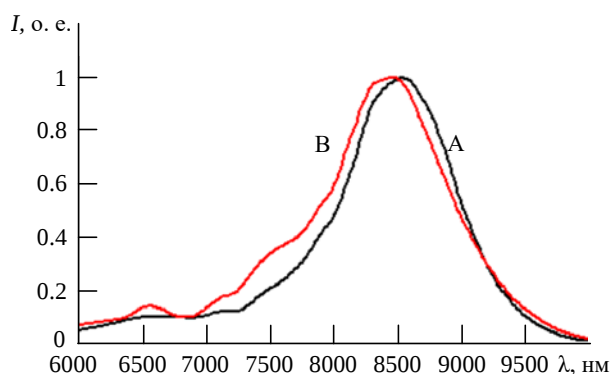


Рис. 3. Нормированные спектры fotocувствительности образцов А и В

Fig. 3. Normalized photosensitivity spectra of A and B images

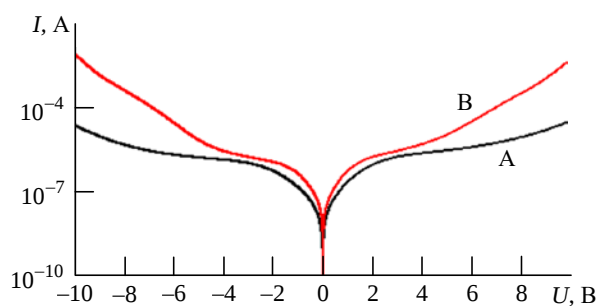


Рис. 4. ВАХ при температуре 77 К

Fig. 4. Current-voltage characteristics at a temperature of 77 K

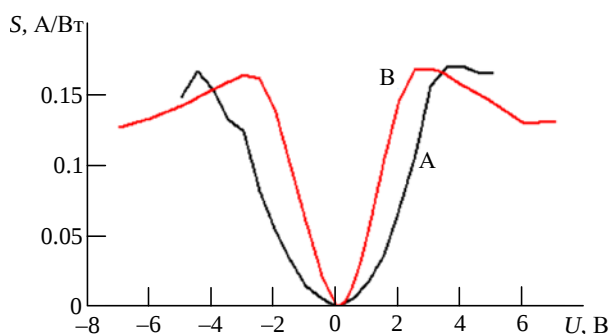


Рис. 5. Графики зависимости токовой чувствительности образцов в максимуме спектра fotocувствительности при температуре 77 К

Fig. 5. Spectra of static current sensitivity at the maximum of the photosensitivity spectrum at a temperature of 77 K

значительное увеличение темнового тока происходит на напряжениях выше 4 В. Это увеличение не является критичным, поскольку изготавливаемые QWIP-матрицы предназначены для работы на напряжениях 1.5...3 В. На рис. 4 также хорошо видно, что ветви ВАХ темнового тока образца В лежат выше по сравнению с ветвями ВАХ образца А. Однако при рабочих напряжениях различие между токами незначительно. В диапазоне напряжений 0...3 В различие между ветвями ВАХ не превышает $1.2 \cdot 10^{-6}$ А.

Данные образцов А и В демонстрируют (рис. 5), что оба образца обладают пиковой чувствительностью выше 0.15 А/Вт. Также рис. 5 показывает, что уменьшение толщины барьера сдвигает максимум чувствительности в область меньших напряжений смещения – образец А имеет максимум чувствительности при напряжении 4 В, образец В – при напряжении 2 В.

Заключение. Исследовано влияние ширины барьера на ВАХ и значение рабочего напряжения смещения QWIP.

Результаты исследования показывают, что при уменьшении ширины потенциального барьера AlGaAs наблюдается смещение пикового значения статической токовой чувствительности в область меньших напряжений смещения. При этом из представленных данных ясно вид-

но, что в диапазоне напряжений до 4 В возрастание темнового тока незначительно.

Таким образом, практическим результатом описанной работы является достижение высокой фоточувствительности на меньших значениях напряжения смещения при сохранении практически неизменных значений темнового тока на напряжениях менее 4 В.

Уменьшение времени, необходимого для роста слоев активной области QWIP-структуры, позволит увеличить эффективность технологического процесса производства либо за счет сокращения общего времени роста, требующегося для изготовления одной гетероструктуры, либо за счет возможности увеличения количества квантовых ям при сохранении общей толщины фоточувствительной области.

Список литературы

1. 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, C. A. Kukkonen, M. Levy, P. LeVan, M. A. Fauci // *Infrared Physics & Technology*. 2001. Vol. 42, № 3–5. P. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8
2. Каталог Радиоэлектронного комплекса. URL: <https://katalog-rek.ru/catalog/395/3823/> (дата обращения 23.11.2023).
3. Li S. S., Tidrow M. Z. Comparison of n- and p-type quantum well infrared photodetectors // *Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II*. 1998. Vol. 3553. P. 97–111. doi: 10.1117/12.318094
4. Henini M., Razeghi M. *Handbook of infrared detection technologies*. Elsevier, 2002. 532 p.
5. Intersubband transitions in quantum wells: physics and device applications / E. R. Weber, H. C. Liu, F. Capasso, R. K. Willardson. Academic press, 1999. 309 p.
6. Levine B. F. Quantum-Well Infrared Photodetectors // *J. of Applied Physics*. 1993. Vol. 74, № 8. P. R1–R81. doi: 10.1063/1.354252
7. 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, № 5–6. P. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5
8. Quantum Well infrared photodetectors: device physics and light coupling / S. Bandara, S. Gunapala, J. Liu, J. Mumolo, E. Luong, W. Hong, D. Sengupta. Springer, 1998. P. 43–49.
9. Zubkov V. I., Ivanova Ia. V., Weyers M. Direct observation of resonant tunneling in heterostructure with a single quantum well // *Appl. Phys. Lett.* 2021. Vol. 119. P. 043503. doi: 10.1063/5.0056842
10. Ultimate performance of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime / E. Lhuillier, I. Ribet-Mohamed, M. Tauvy, A. Nedelcu, V. Berger, E. Rosencher // *Infrared physics & technology*. 2009. Vol. 52, № 4. P. 132–137.
11. Wasilewski Z. R., Liu H. C., Buchanan M. Studies of Si segregation in GaAs using current-voltage characteristics of quantum well infrared photodetectors // *J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1994. Vol. 12, № 2. P. 1273–1276. doi: 10.1116/1.587020
12. Luna E., Guzman A., Munoz E. Offset in the dark current characteristics of photovoltaic double barrier quantum well infrared photodetectors // *Infrared physics & technology*. 2005. Vol. 47, № 1–2. P. 22–28. doi: 10.1016/j.infrared.2005.02.007
13. 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
14. Characterization of the dark current of a quantum well infrared photodetector (QWIP) with selectively doped barrier layers/ Y. Uchiyama, H. Nishino, Y. Matsukura, T. Miyatake, K. Yamamoto, T. Fujii // *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*. 2002. Vol. 4721. P. 151–158. doi: 10.1117/12.478844
15. Effect of barrier width on the performance of quantum well infrared photodetector / S. K. H. Sim, H. C. Liu, A. Shen, M. Gao, K. F. Lee, M. Buchanan, Y. Ohno, H. Ohno, E. H. Li // *Infrared Physics & Technology*. 2001. Vol. 42, № 3–5. P. 115–121. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00067-6

16. Dark currents of GaAs/AlGaAs quantum-well infrared photodetectors / N. Li, D.-Y. Xiong, X.-F. Yang, W. Lu, W.-L. Xu, C.-L. Yang, Y. Hou, Y. Fu //

Applied Physics A. 2007. Vol. 89. P. 701–705. doi: 10.1007/s00339-007-4142-2

Информация об авторах

Богословская Лана Сергеевна – аспирантка Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), инженер АО "Светлана-Рост", сквозной технолог по направлению QWIP. Автор семи научных публикаций. 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>

Дудин Анатолий Леонидович – главный технолог 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>

References

1. 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 C. 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, no. 3–5, pp. 267–282. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00085-8

2. Radioelectronic Complex Catalog. Available at: <https://katalog-rek.ru/catalog/395/3823/> (accessed 23.11.2023).

3. Li S. S., Tidrow M. Z. Comparison of n- and p-Type Quantum Well Infrared Photodetectors. *Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II*. 1998, vol. 3553, pp. 97–111. doi: 10.1117/12.318094

4. Henini M., Razeghi M. *Handbook of Infrared Detection Technologies*. Elsevier, 2002, 532 p.

5. Weber E. R., Liu H. C., Capasso F., Willardson R. K. *Intersubband Transitions in Quantum Wells: Physics and Device Applications*. Academic Press, 1999, 309 p.

6. Levine B. F. Quantum-Well Infrared Photodetectors. *J. of Applied Physics*. 1993, vol. 74, no. 8, pp. R1–R81. doi: 10.1063/1.354252

7. 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, no. 5–6, pp. 473–480. doi: 10.1016/S1350-4495(03)00169-5

8. Bandara S., Gunapala S., Liu J., Mumolo J., Luong E., Hong W., Sengupta D. Quantum Well Infrared

Photodetectors: Device Physics and Light Coupling. Springer, 1998, pp. 43–49.

9. Zubkov V. I., Ivanova Ia. V., Weyers M. Direct Observation of Resonant Tunneling in Heterostructure with a Single Quantum Well. *Appl. Phys. Lett.* 2021, vol. 119, p. 043503. doi: 10.1063/5.0056842

10. Lhuillier E., Ribet-Mohamed I., Tauvy M., Nedelcu A., Berger V., Rosencher E. Ultimate Performance of Quantum Well Infrared Photodetectors in the Tunneling Regime. *Infrared Physics & Technology*. 2009, vol. 52, no. 4, pp. 132–137.

11. Wasilewski Z. R., Liu H. C., Buchanan M. Studies of Si Segregation in GaAs Using Current–Voltage Characteristics of Quantum Well Infrared Photodetectors. *J. of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1994, vol. 12, no. 2, pp. 1273–1276. doi: 10.1116/1.587020

12. Luna E., Guzman A., Munoz E. Offset in the Dark Current Characteristics of Photovoltaic Double Barrier Quantum Well Infrared Photodetectors. *Infrared Physics & Technology*. 2005, vol. 47, no. 1–2, pp. 22–28. doi: 10.1016/j.infrared.2005.02.007

13. 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

14. Uchiyama Y., Nishino H., Matsukura Y.,

Miyatake T., Yamamoto K., Fujii T. Characterization of the Dark Current of a Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) with Selectively Doped Barrier Layers. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII. 2002, vol. 4721, pp. 151–158. doi: 10.1117/12.478844

15. Sim S. K. H., Liu H. C., Shen A., Gao M., Lee K. F., Buchanan M., Ohno Y., Ohno H., Li E. H. Effect of Barrier Width on the Performance of Quan-

tum Well Infrared Photodetector. Infrared Physics & Technology. 2001, vol. 42, no. 3–5, pp. 115–121. doi: 10.1016/S1350-4495(01)00067-6

16. Li N., Xiong D.-Y., Yang X.-F., Lu W., Xu W.-L., Yang C.-L., Hou Y., Fu Y. Dark Currents of GaAs/AlGaAs Quantum-Well Infrared Photodetectors. Applied Physics A. 2007, vol. 89, pp. 701–705. doi: 10.1007/s00339-007-4142-2

Information about the authors

Lana S. Bogoslovskaya – postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, engineer of JSC "Svetlana-Rost". End-to-end technologist in the QWIP direction. The author of 7 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>

Anatoliy L. Dudin – 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>

Способы подключения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с концентрической формой электродов

М. А. Сорвина✉, А. С. Кукаев

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

✉ masorvina@etu.ru

Аннотация

Введение. В современном мире датчики ускорения востребованы в сферах от пользовательской электроники до космической техники. Микроакселерометры обладают достоинствами в виде компактных габаритов, малой массы, простоты интеграции с другими компонентами. Наиболее распространены акселерометры на микроэлектромеханических системах. Однако, ввиду хрупкости упругих подвесов, они обладают низкой ударопрочностью, что не позволяет применять их на высокодинамичных объектах, обладающих ускорениями до 50 000 g. Авторами предлагается использовать микроакселерометры на поверхностных акустических волнах, представляющие собой твердотельные монолитные конструкции, способные выдерживать высокие ударные нагрузки. В предыдущих работах была предложена концепция концентрической формы электродов, обладающей более высокой энергоэффективностью по сравнению с линейными конструкциями. Тем не менее, такую форму сложно подключить к электрической схеме, так как нет возможности подвести шины напрямую. Поэтому в данной статье описываются и моделируются 5 альтернативных методов подключения чувствительного элемента.

Цель работы. Выбрать оптимальный с точки зрения сохранения целостности электродов и минимального влияния на распространение поверхностных акустических волн способ подключения чувствительного элемента микроакселерометра.

Материалы и методы. Моделирование методом конечных элементов в программе Comsol Multiphysics.

Результаты. Предложены и проанализированы 5 способов подключения: навесной монтаж; удаление сектора электродов; заливка металлом отверстий в электродах и подложке; протягивание проводов через отверстия в подложке; вывод контактных шин по боковой грани. Проведено компьютерное моделирование. Представлены графики амплитудно-частотной характеристики.

Заключение. Из рассмотренных способов подключения чувствительного элемента наиболее целесообразным представляется метод № 3 с отверстиями в электродах и выводением контактов на нижнюю сторону подложки, так как график амплитудно-частотной характеристики практически совпадает с характеристикой датчика без подключений (образцового). Направление будущих исследований – создание опытного образца и проведение с ним испытаний в лабораторных условиях.

Ключевые слова: микроакселерометр, чувствительный элемент, поверхностные акустические волны, методы подключения, концентрическая топология

Для цитирования: Сорвина М. А., Кукаев А. С. Способы подключения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с концентрической формой электродов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 81–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-81-90

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ 23-79-10259 в форме субсидий в сфере научной и научно-технической деятельности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024; принята к публикации после рецензирования 14.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Methods for Connecting a Concentrically Shaped Sensing Element of Microaccelerometers on Surface Acoustic Waves

Maria A. Sorvina✉, Alexander S. Kukaev

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ masorvina@etu.ru

Abstract

Introduction. At present, acceleration sensors are in demand in various areas, from consumer electronics to space technology. Microaccelerometers exhibit the advantages of compact dimensions, light weight, and ease of integration with other components. The most common accelerometers are based on microelectromechanical systems. However, due to the fragility of elastic suspensions, these devices are characterized by low impact resistance, which impedes their application in highly dynamic objects with accelerations of up to 50 000 *g*. The authors propose to use microaccelerometers based on surface acoustic waves, which are solid-state monolithic structures capable of withstanding high shock loads. Previous work has proposed the concept of concentric electrodes, which are more energy efficient compared to linear designs. However, concentric elements are difficult to connect to the electrical circuit, due to the impossibility of connecting the busbars directly. Therefore, the authors describe and simulate five alternative methods for connecting the sensing element of such devices.

Aim. To select an optimal method for connecting the sensing element of microaccelerometers from the standpoint of maintaining the integrity of the electrodes and ensuring minimal influence on the propagation of surface acoustic waves.

Materials and methods. Finite element simulation in the COMSOL Multiphysics software.

Results. Five connection methods, including point-to-point wiring, removing the electrode sector, filling holes in the electrodes and substrate with metal, pulling wires through holes in the substrate and bringing out contact bars along the side face, were proposed and analyzed. Computer simulation was carried out. Graphs of the amplitude-frequency characteristic are presented.

Conclusion. Among the considered methods for connecting the sensing element, the most appropriate seems to be method No. 3, which implies holes in the electrodes and contacts on the bottom side of the substrate. Here, the graph of the amplitude-frequency characteristic practically coincides with that of the sensor without connections (reference). Future work will focus on creating a prototype and its experimental testing.

Keywords: microaccelerometer, sensing element, surface acoustic waves, connection methods, concentric topology

For citation: Sorvina M. A., Kukaev A. S. Methods for Connecting a Concentrically Shaped Sensing Element of Microaccelerometers on Surface Acoustic Waves. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 81–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-81-90

Source of funding. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of the Russian Science Foundation grant 23-79-10259 in the form of subsidies in the field of scientific and scientific-technical activities.

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

Submitted 06.03.2024; accepted 14.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Сегодняшний мир уже трудно представить без акселерометров, датчиков ускорения, применяемых повсеместно в пользовательской электронике, производственной робототехнике, медицине, геофизике, автомобилестроении, воздушном, железнодорожном и морском транспорте [1–6]. Наибольшим спросом на рынке сейчас пользуются микроакселерометры, которые в отличие от "традиционных" типов обладают зна-

чительно меньшими габаритами, что позволяет легко уменьшать размеры механических деталей и совмещать их с электронными компонентами на одной монтажной подложке. Существует 3 группы микроакселерометров:

1) реализованные на микроэлектромеханических системах (МЭМС): они делятся по типу чувствительного элемента (ЧЭ) на пьезоэлектрические, пьезорезистивные и емкостные;

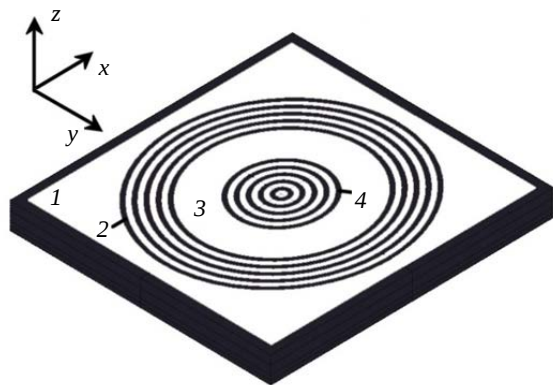


Рис. 1. ЧЭ микроакселерометра на ПАВ с концентрической формой топологии электродов

Fig. 1. Sensing element (SE) of a microaccelerometer on surface acoustic waves (SAW) with concentric electrodes

сдвигу фазы можно судить об ускорении объекта, на котором установлен датчик. В последние годы ученые пытаются попробовать новые нестандартные концепции организации ЧЭ, чтобы добиться более высоких характеристик сенсоров. Так, например, в [14, 15] была предложена кольцевая форма резонатора. Авторы данной статьи предлагают концентрическую топологию, подробно описанную в [16, 17]. Предлагаемая концепция представлена на рис. 1. На пьезоэлектрическую подложку 1 из ниобата лития нанесены возбуждающий и приемный ВШП (2 и 4 соответственно), 3 – рабочая область линии задержки. Форма электродов является эллиптической в связи с анизотропией монокристалла,

влияющей на скорость распространения волны. Данная концепция видится перспективной для исследования, потому что выдвигается гипотеза о более высокой энергоэффективности по сравнению с линейными топологиями за счет отсутствия рассеивания энергии.

Для изготовления опытного образца концентрического ЧЭ необходимо рассмотреть вопрос подключения такой конструкции к электрической схеме, поскольку стандартный метод подвода контактов напрямую через контактные дорожки не возможен ввиду особенностей организации электродов. Цель описываемой работы – предложить и теоретически проанализировать методы съема сигнала, а также провести сравнительное компьютерное моделирование наиболее многообещающих идей.

В модели концентрического ЧЭ присутствуют 4 группы электродов (рис. 2, 4–7): возбуждающие, на которые подается входной гармонический сигнал (обозначены голубым цветом); возбуждающие, которые выступают в роли заземления (желтый цвет); приемные изопотенциальные (серый цвет); приемные изопотенциальные 2 (зеленый цвет). К каждой из этих групп необходимо подвести общую шину.

В методе № 1 предлагается использовать навесной монтаж, чтобы подводить провода напрямую к электродам (рис. 2). Также можно

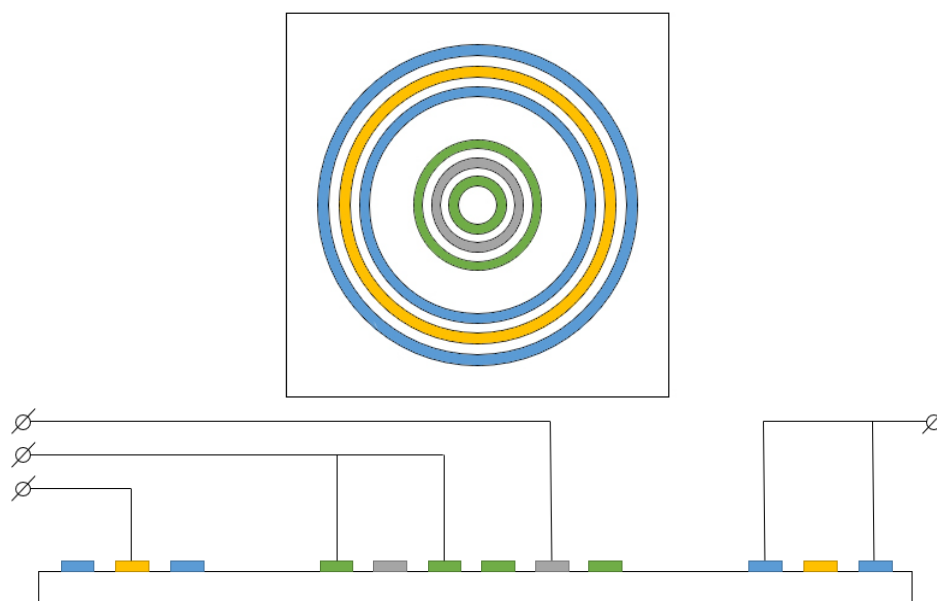


Рис. 2. Метод № 1. Навесной монтаж ЧЭ микроакселерометра на ПАВ

Fig. 2. Method No. 1. Point-to-point wiring of the SE of a SAW microaccelerometer

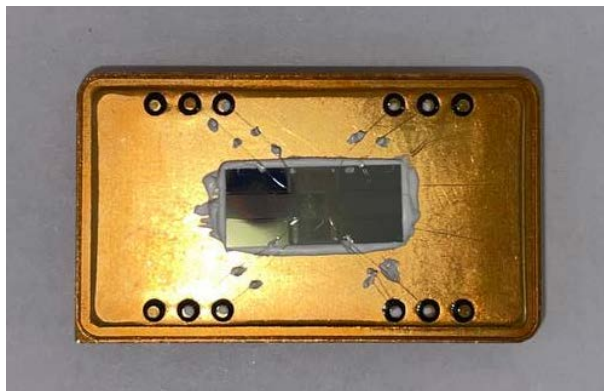


Рис. 3. Образец ЧЭ с навесным монтажом

Fig. 3. Sample of a point-to-point wired SE

подключить приемные ВШП, просверлив дополнительное отверстие в центре подложки и выводя провода через него на заднюю сторону для дальнейшей припайки.

В качестве дополнительных мягких опор предлагается использовать клей, что позволит избежать короткого замыкания проводов (рис. 3).

Недостатком данного метода является потеря главного преимущества микроакселерометров на ПАВ – высокой ударопрочности, так как провода легко могут оторваться при ударе. Также технологический процесс пайки усложняется ввиду необходимости организации контакта с ВШП, шириной, не превышающей $1/4$ длины акустической волны, что составляет 0.1828 мм для расчетной частоты 5 МГц. При этом диапазон частот, на котором работают устройства на ПАВ, составляет от 5 до 433 МГц. Соответственно, с увеличением частоты, согласно формуле

$$\lambda = v/v,$$

где v – скорость волны; v – частота, длина волны λ еще уменьшится, что приведет к сужению поверхности электрода и к возникновению дополнительных технических трудностей при реализации процесса пайки.

В методе № 2 вырезается один сектор из кольцевых ВШП, на освободившейся поверхности подложки проводятся две шины к возбуждающей и приемной группам электродов. Далее шины ведут к четырем контактным площадкам для припаивания ЧЭ к электрической схеме (рис. 4).

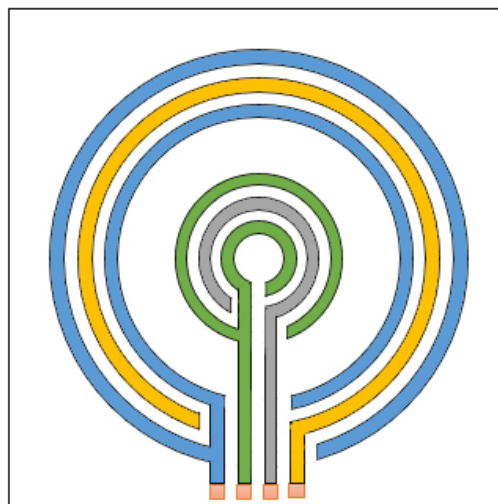


Рис. 4. Метод № 2. Организация шин в разрывах концентрических ВШП

Fig. 4. Method No. 2. Organization of busses in ruptures of concentric interdigital transducers (IDTs)

Безусловным недостатком второго метода является нарушение концентрической структуры электродов, что, вероятно, способно негативно повлиять на распространение ПАВ в области линии задержки.

В рамках метода № 3 предлагается подключать электроды по группам (обозначены на рис. 5, а красной пунктирной линией) через заранее просверленные в них отверстия. Отверстие заливается металлом, и с обратной стороны подложки к нему подводится металлическая дорожка, которая служит общей шиной для каждой определенной группы электродов. При этом, во избежание появления перекрестной электрической связи предлагается разносить отверстия на угол 90° друг относительно друга (рис. 5, б).

В методе № 4 в отличие от предыдущего предлагается просверлить отверстия рядом с электродом и протянуть через них провода на нижнюю поверхность ЧЭ (рис. 6, а, б). В таком случае отсутствуют общие шины, что позволяет выстроить отверстия в одну линию.

Стоит отметить, что недостатками и третьего, и четвертого методов являются потребность в дополнительной операции сверления и необходимость освободить нижнюю поверхность подложки. Второй недостаток не является проблемной задачей, так как возможно закрепление ЧЭ микроакселерометра по периметру звукопровода, позволяющее оставить и верхнюю, и нижнюю поверхности свободными.

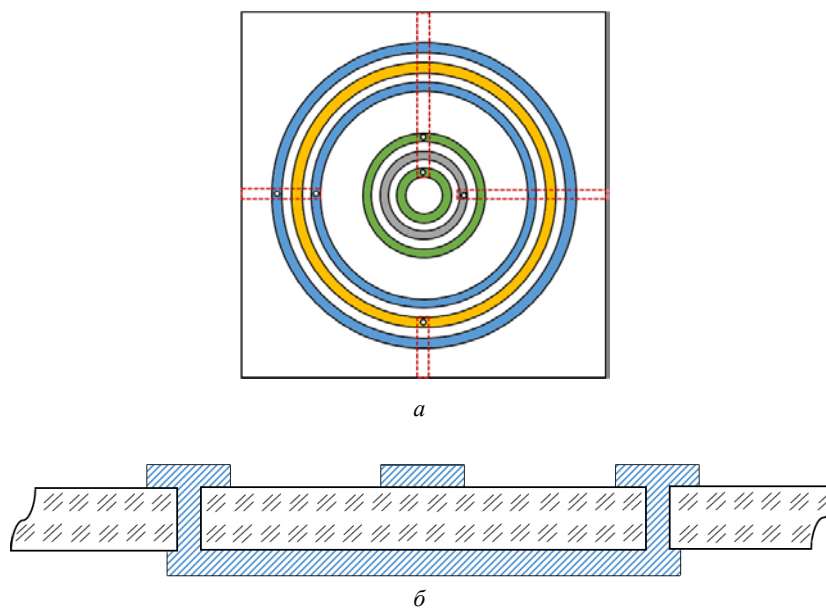


Рис. 5. Метод № 3. Подвод контактов к ЧЭ через отверстия в ВШП: а – вид сверху; б – боковой разрез
 Fig. 5. Method No. 3. Mounting contacts to the SE through holes in the IDTs: а – top view; б – side section

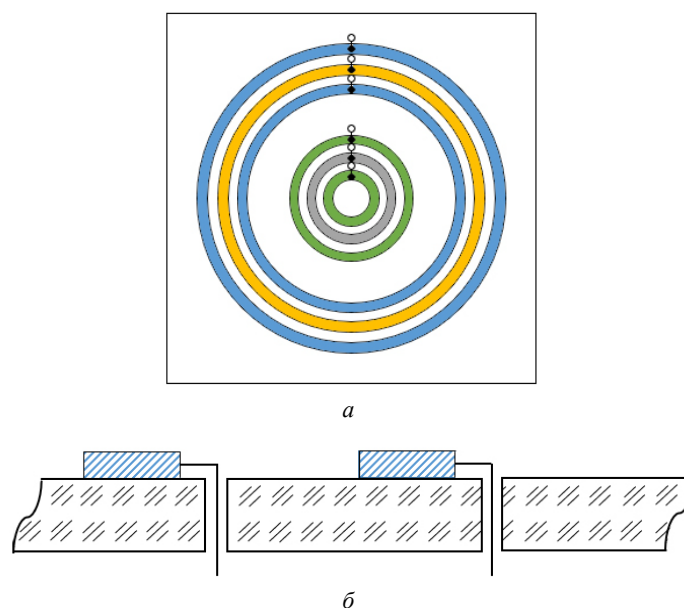


Рис. 6. Метод № 4. Подвод контактов к ЧЭ через отверстия в подложке: а – вид сверху; б – боковой разрез
 Fig. 6. Method No. 4. Mounting contacts to the SE through holes in the substrate: а – top view; б – side section

В методе № 5 (рис. 7) предлагается вырезать отверстие в подложке и через боковые поверхности 1 и 2 провести дорожки от групп электродов на противоположную сторону подложки. Во избежание возникновения электрических перекрестных связей предлагается разнести дорожки следующим образом: возбуждающую группу, обозначенную голубым цветом, вести по ребру 1, заземляющую группу, изображенную желтым цветом, – по ребру 2, и две приемные группы

(здесь зеленая и серая) аналогично проводить по ребрам 1 и 2 соответственно.

Следует отметить, что создание отверстий в материале подложки (методы № 3–5) и контактных шин на ее поверхности (метод № 2) могут влиять на распространение акустической волны. Вероятнее всего наибольшее влияние будут вносить отверстия рядом с электродами в материале подложки (метод № 4). Таким образом, с точки зрения наименьших потерь для распространения

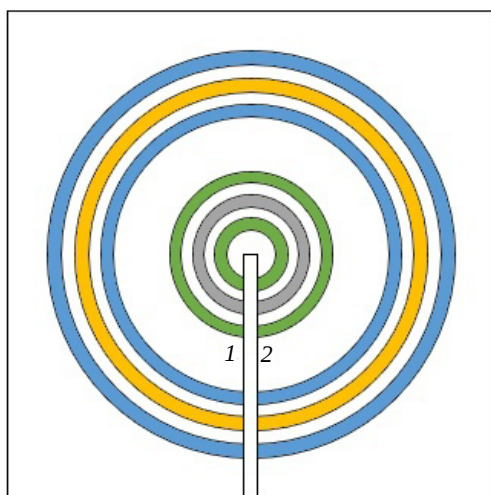


Рис. 7. Метод № 5. Вывод контактов через вырезанное отверстие в подложке

Fig. 7. Method No. 5. Output of contacts through a cut hole in the substrate

ПАВ наилучшим выглядит метод № 3. Для дальнейшего рассмотрения и окончательного выбора предлагается осуществить компьютерное моделирование распространения ПАВ для описанных случаев.

Материалы и методы. Компьютерное моделирование позволяет произвести симуляцию различных вариаций датчика без длительного и затратного процесса изготовления опытных образцов. Моделирование ЧЭ проводилось в программном обеспечении Comsol Multiphysics. Данная программа обладает тем преимуществом над иными способами моделирования, что производит одновременный учет как прямого и обратного преобразования электрического сигнала в акустический, так и явлений, сопровождающих возбуждение, распространение и детектирование акустических волн.

В качестве материала подложки используется монокристалл ниобата лития, для материала электродов и контактных шин выбран алюминий. Их характеристики представлены в таблице.

Моделирование методом конечных элементов предусматривало следующие стадии:

Параметры материалов в чувствительном элементе

Material parameters in the sensing element

Параметр	Ниобат лития 128° YX-среза	Алюминий
Скорость распространения волны, м/с	3961	–
Плотность, кг/м ³	4640	2712
Модуль упругости, ГПа	170	68.5
Коэффициент Пуассона	0.25	0.33
Предел прочности, МПа	110	90

- 1) выбор физики для соответствующей задачи и типа решателя;
- 2) создание геометрии модели ЧЭ;
- 3) задание материала, граничных условий и нагрузок на модель;
- 4) разбиение сеткой на конечные элементы;
- 5) автоматическое численное решение уравнений;
- 6) анализ результатов.

Таким образом, для моделирования способов подключения ЧЭ была создана трехмерная модель шириной 1/4 длины волны. Тип физики – пьезоэлектрика, включающая в себя подразделы: электростатика и механика. Расчет велся в частотной области от 4.5 до 5.5 МГц с шагом 0.01 МГц. На модель были заданы материалы (материал подложки: ниобат лития, материал электродов: алюминий), гармонический сигнал амплитудой 1 В, заземление, граничные условия на боковые грани, симулирующие продолжение по осям x и y материалов подложки и электродов, жесткое закрепление по периметру нижней грани подложки и PML-слой, являющийся квазибесконечным пространством, в котором гаснет акустическая волна для избежания возникновения эффектов переотражения от границ модели.

Результаты. Созданные компьютерные модели для методов № 1, 3, 4 показаны на рис. 8.

Графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для этих случаев представлены на рис. 9.

Как видно из рисунка, АЧХ в методах № 1 и № 3 достигает пикового значения –60 дБ. Наличие этого значения не представляет существенного интереса в рамках описываемой работы, потому что сейчас используется намного меньшее количество электродов (5 штук) по сравнению с реальными датчиками, где оно составляет 50–100 штук. Также для моделирования используется псевдотрехмерная модель, чтобы сократить время расчета. Цель данного моделирования – сравнить АЧХ ЧЭ без подключения с вариациями подключений, считая

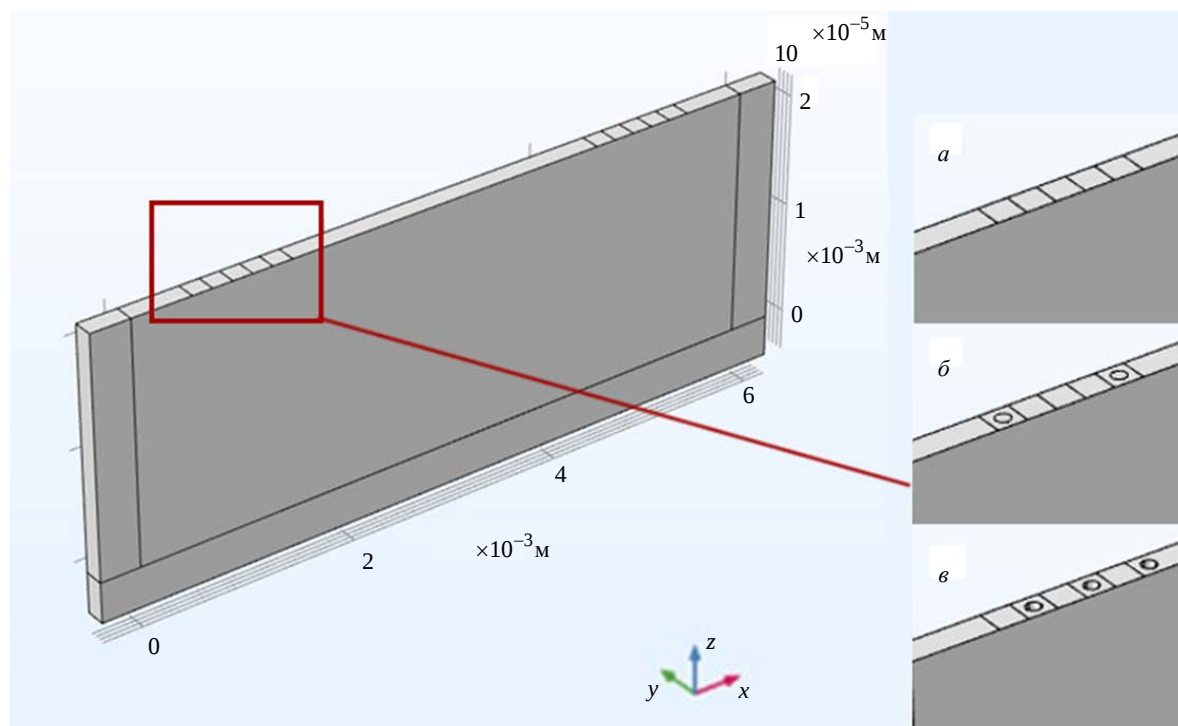


Рис. 8. Моделирование методов подключения: а – метод № 1; б – метод № 3; в – метод № 4
Fig. 8. . Simulation of connection methods: а – method No. 1; б – method No. 3; в – method No. 4

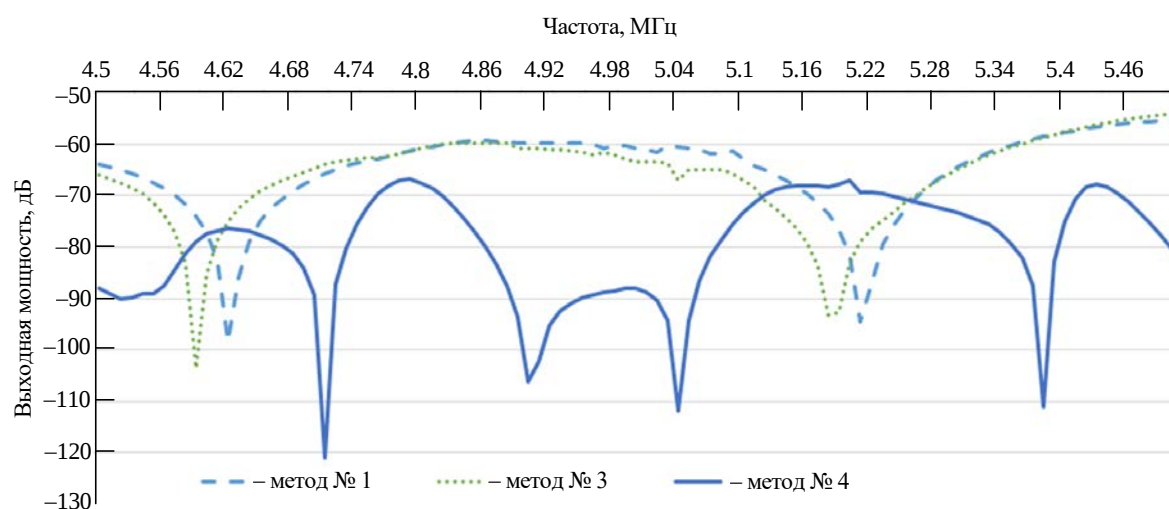


Рис. 9. АЧХ ЧЭ для разных методов подключения
Fig. 9. Amplitude-frequency characteristic of SE for different connection methods

АЧХ для метода № 1 идеальной. Как видно из графиков, метод № 3 является самым перспективным, так как сдвиг АЧХ минимален.

Закключение. Таким образом, в ходе работы были описаны 5 методов подключения, смоделированы 3 наиболее перспективных из них. Из всех рассмотренных способов подключения ЧЭ наиболее подходящим представляется метод № 3 с отверстиями в электродах, так как его АЧХ близка к АЧХ датчика без подключений. Метод № 4 приводит к значительным искажениям

характеристики. Финальный выбор метода подключения будет производиться на стадии выбора технического процесса исполнения датчика. Так как при высокочастотных применениях электроды будут еще более узкими, потребуется консультация технолога по способу пайки.

Направление будущих исследований – моделирование методов № 2 и 5 на полноразмерной трехмерной модели, создание опытного образца и проведение с ним испытаний в лабораторных условиях.

Список литературы

1. Marek J. MEMS for automotive and consumer electronics // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), Francisco, USA, 07–11 Feb. 2010. IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISSCC.2010.5434066
2. Khorgade M. P., Gaidhane A. Applications of MEMS in Robotics and BioMEMS // UkSim 13th Intern. Conf., Cambridge, UK, 30 March–01 Apr. 2011. IEEE, 2011. doi: 10.1109/UKSIM.2011.106
3. Panescu D. MEMS in medicine and biology // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2006. Vol. 25, iss. 5. P. 19–28. doi: 10.1109/MEMB.2006.1705742
4. Application of MEMS accelerometer to geophysics / Takao Aizawa, Toshinori Kimura, Toshifumi Matsuoka, Tetsuya Takeda, Youichi Asano // Intern. J. of the JCRM. 2009. Vol. 4, iss. 2. P. 33–36. doi: 10.11187/ijcrm.4.33
5. MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review / G. Bhatt, K. Manoharan, P. S. Chauhan, Sh. Bhattacharya // Sensors for Automotive and Aerospace Applications. Springer, Singapore, 2019. P. 223–229. doi: 10.1007/978-981-13-3290-6_12
6. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028
7. Классификация акселерометров и сферы применения. URL: <https://inelso.ru/library/statyi/klassifikatsiya-akselerometrov-i-sfery-primeneniya/> (дата обращения 14.02.2024)
8. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцов В. Ю. Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах // Микросистемная техника. 2001. № 2. С. 3–7.
9. Micro rate gyroscopes based on surface acoustic waves / D. Lukyanov, S. Shevchenko, A. Kukaev, A. Ivanov, R. Telichkin // NORCHIP. Tampere, Finland, 27–28 Oct. 2014. IEEE, 2014. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004702
10. Structural Design of MEMS Acceleration Sensor Based on PZT Plate Capacitance Detection / Min Cui, Senhui Chuai, Yong Huang, Yang Liu, Jian Li // Micromachines. 2023. Vol. 14, iss. 8. P. 1565. doi: 10.3390/mi14081565
11. Балышева О. Л. Акустоэлектронная компонентная база // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 1–28.
12. Секреты высокой точности. URL: <https://topwar.ru/78855-sekret-y-vysokoy-tochnosti.html> (дата обращения 14.02.2024)
13. Никонова Г. С., Аржанов В. А. Исследование характеристик генераторов на поверхностных акустических волнах // Омский науч. вестн. 2012. № 3. С. 331–334.
14. Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А., Ньямверу Б. Оптимизация конструкции встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 51–62. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-51-62
15. Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А. Оптимальный габаритный параметр кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 89–100. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100
16. Сорвина М. А. Исследование концентрической топологии для применения в чувствительных элементах инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах // XXIV конф. молодых ученых "Навигация и управление движением", Санкт-Петербург, 15–18 марта 2022 г. С. 217–219.
17. Sorvina M. A. Concentric Topology for Sensitive Elements of Surface Acoustic Wave Devices // Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424262

Информация об авторах

Кукаев Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2016), и. о. заведующего кафедрой прикладной механики и инженерной графики, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов: системы и устройства навигации; компьютерное моделирование физических процессов.

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

E-mail: askukaev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9525-8412>

Сорвина Мария Александровна – аспирантка кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов: навигационные датчики на акустических волнах; компьютерное моделирование физических процессов.

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

E-mail: masorvina@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0309-5641>

References

1. Marek J. MEMS for Automotive and Consumer Electronics. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), Francisco, USA, 07–11 Feb. 2010. IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISSCC.2010.5434066
2. Khorgade M. P., Gaidhane A. Applications of MEMS in Robotics and BioMEMS. UkSim 13th Intern. Conf., Cambridge, UK, 30 March 2011–01 Apr. 2011. IEEE, 2011. doi: 10.1109/UKSIM.2011.106
3. Panescu D. MEMS in Medicine and Biology. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2006, vol. 25, iss. 5, pp. 19–28. doi: 10.1109/EMMB.2006.1705742
4. Takao Aizawa, Toshinori Kimura, Toshifumi Matsuoka, Tetsuya Takeda, Youichi Asano. Application of MEMS Accelerometer to Geophysics. Intern. J. of the JCRM. 2009, vol. 4, iss. 2, pp. 33–36. doi: 10.11187/ijjcrm.4.33
5. Bhatt G., Manoharan K., Chauhan P. S., Bhattacharya Sh. MEMS Sensors for Automotive and Aero-space Applications. Springer, Singapore, 2019, pp. 223–229. doi: 10.1007/978-981-13-3290-6_12
6. Peshekhonov V. G. The Author of Precision Gyroscope. Gyroscopy and Navigation. 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028 (In Russ.)
7. Classification of accelerometers and scope of application. Available at: <https://inelso.ru/library/statyi/klassifikatsiya-akselerometrov-i-sfery-primeneniya/> (accessed 14.02.2024)
8. Lukyanov D. P., Luchinin V. V., Skvortsov V. Yu. Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves. Microsystem Technology. 2001, no. 2, pp. 3–7. (In Russ.)
9. Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A., Ivanov A., Telichkin R. Micro Rate Gyroscopes Based on Surface Acoustic Waves. NORCHIP. Tampere, Finland, 27–28 Oct. 2014. IEEE, 2014. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004702
10. Min Cui, Senhui Chuai, Yong Huang, Yang Liu, Jian Li. Structural Design of MEMS Acceleration Sensor Based on PZT Plate Capacitance Detection. Micromachines. 2023, vol. 14, iss. 8, p. 1565. doi: 10.3390/mi14081565
11. Balysheva O. L. Acoustoelectronic Component Base. J. of Radioelectronics. 2014, no. 6, pp. 1–28. (In Russ)
12. Secrets of High Accuracy. Available at: <https://topwar.ru/78855-sekret-y-vysokoy-tochnosti.html> (accessed 14.02.2024)
13. Nikonova G. S., Arzhanov V. A. Study of the Characteristics of Generators on Surface Acoustic Waves. Omsk Bulletin. 2012, no. 3, pp. 331–334. (In Russ.)
14. Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A., Nyamweiru B. Optimizing the Design of Surface-Acoustic-Wave Ring Resonator by Changing the Interdigitated Transducer Topology. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 51–62. (In Russ.)
15. Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A. Optimal Overall Dimensions of a Surface Acoustic Waves Ring Resonator. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 89–100. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100 (In Russ.)
16. Sorvina M. A. Investigation of Concentric Topology for Application in Sensitive Elements of Inertial Sensors on Surface Acoustic Waves. XXIV Conf. of Young Scientists "Navigation and Traffic Control", St Petersburg 15–18 March 2022, pp. 217–219. (In Russ.)
17. Sorvina M. A. Concentric Topology for Sensitive Elements of Surface Acoustic Wave Devices. Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424262

Information about the authors

Alexander S. Kukaev, Cand. Sci. (2016), Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: navigation systems and devices; computer modeling of physical processes.

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

E-mail: askukaev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9525-8412>

Maria A. Sorvina, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: navigation sensors based on acoustic waves, computer modeling of physical processes.

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

E-mail: masorvina@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0309-5641>

Алгоритм обработки измерений параметров внешнего дыхания с использованием системы захвата движений

А. В. Дроздова[✉], А. Н. Ткаченко, Е. М. Скребова, И. А. Сакун

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

[✉] alyona_ch@bk.ru

Аннотация

Введение. В медицине изучение дыхания критически важно для диагностики и мониторинга здоровья. Определение параметров дыхания, таких как частота, необходимо для оценки состояния дыхательной системы. Однако традиционные методы, например спирометрия, имеют ограничения. Системы захвата движений, такие как маркерный видеоанализ, предлагают перспективный и инновационный подход для измерения параметров дыхания в совокупности с другими исследованиями, которые можно проводить с этой системой. Такой подход обеспечивает точные данные о дыхательной активности без необходимости специализированного медицинского оборудования. Использование таких систем может значительно расширить область их применения в реабилитационной и спортивной медицине.

Цель работы. Разработка алгоритма определения параметров дыхания с помощью маркерной системы захвата движения. Разработка алгоритма оптимального положения тела и наилучших местоположений маркеров для определения параметров дыхания. Анализ контрольных измерений.

Материалы и методы. Рассматриваются данные, полученные в результате синхронной регистрации сигналов с оптической системы захвата движений и спирометра. Определение частоты дыхания осуществляется методом спектрального анализа и преобразования Фурье.

Результаты. Разработан алгоритм анализа и интерпретации частоты дыхания, позволяющий учитывать положения тела, области расположения маркеров и предоставляющий рекомендации относительно их оптимального размещения.

Заключение. Результаты исследований показали перспективность применения маркерного видеоанализа для оценки частоты дыхательных движений с использованием системы захвата движения. Предполагается проведение дополнительных исследований с учетом физической активности с целью разработки эффективных методов диагностики параметров внешнего дыхания и выявления дыхательных нарушений.

Ключевые слова: частота дыхания, система захвата движений, маркерный видеоанализ, спектральный анализ, спирометрия

Для цитирования: Алгоритм обработки измерений параметров внешнего дыхания с использованием системы захвата движений / А. В. Дроздова, А. Н. Ткаченко, Е. М. Скребова, И. А. Сакун // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 91–102. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-91-102

Благодарности. Выражаем признательность коллегам из Института физиологии им. И. П. Павлова, которые оказали помощь в выполнении исследования на базе лаборатории физиологии движений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; принята к публикации после рецензирования 29.05.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Algorithm for Processing Measurements of External Respiration Parameters Using Motion Capture Systems

Alyona V. Drozdova[✉], Anna N. Tkachenko, Elena M. Skrebova, Ivan A. Sakun

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉] alyona_ch@bk.ru

Abstract

Introduction. In healthcare, breath analysis is increasingly used to detect diseases and monitor human health. Assessment of respiratory parameters, such as breathing frequency, is an important component in evaluating the overall state of the respiratory system. However, conventional methods, such as spirometry, have their limitations. Motion capture systems, such as marker-based video analysis, offer a promising and innovative approach for measuring respiratory parameters in conjunction with other investigations. This approach provides accurate data on respiratory activity without requiring specialized medical equipment. The use of such systems has the potential to significantly extend the scope of their application in rehabilitation and sports medicine.

Aim. Development of an algorithm for determining breathing parameters using a marker-based motion capture system. Development of an algorithm for optimal body position and best marker locations for determining breathing parameters. Analysis of control measurements.

Materials and methods. The data obtained as a result of synchronous recording of signals from an optical motion capture system and a spirometer were analyzed. The respiration rate was determined by spectral analysis and Fourier transform.

Results. An algorithm for analyzing and interpreting respiratory rate was developed. This algorithm not only considers body positions and marker locations, but also provides recommendations regarding their optimal placement.

Conclusion. The results obtained confirm the prospects of marker video analysis in assessing the frequency of respiratory movements using a motion capture system. Further studies will be aimed at taking physical activity into account with the purpose of developing effective diagnostic methods of external respiration parameters and respiratory disorders.

Keywords: respiratory rate, motion capture system, marker video analysis, spectral analysis, spirometry

For citation: Drozdova A. V., Tkachenko A. N., Skrebova E. M., Sakun I. A. Algorithm for Processing Measurements of External Respiration Parameters Using Motion Capture Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 91–102. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-91-102

Acknowledgements. We express our gratitude to our colleagues from the Pavlov Institute of Physiology. We are grateful to our colleagues from the Pavlov Institute of Physiology who helped us to carry out the study on the basis of the laboratory of physiology of movements.

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

Submitted 05.04.2024; accepted 29.05.2024; published online 27.09.2024

Введение. Реабилитация дыхания – важный аспект в медицинской практике, в особенности в контексте ухудшения или изменения функционирования органов дыхания, вызванных различными болезнями и состояниями. В большинстве случаев нарушения функции дыхания обусловлены хроническими заболеваниями легких, инфекциями верхних дыхательных путей, последствиями операций и травм.

Определение частоты дыхания (ЧД) пациента и ее изменения является одним из важнейших параметров, необходимых для эффективного мониторинга состояния здоровья пациента и проведения соответствующих медицинских мероприятий. Например, увеличение частоты сердечных сокращений (ЧСС) может указывать на проблемы с дыхательной функцией, а снижение – на возможные сердечно-сосудистые проблемы

или другие патологии. Однако точная и постоянная оценка ЧСС может представлять собой сложную задачу для медицинских работников, особенно при интенсивном лечении или реабилитации больных в клинике.

Методы регистрации ЧД. Способы измерения ЧД могут быть разделены на две категории в зависимости от природы их воздействия на объект измерения: контактные, требующие непосредственного контакта с пациентом или его телом, и бесконтактные, осуществляемые без прямого физического воздействия на объект измерения [1, 2].

В группу контактных методов входит пневмография. Данный инструмент предполагает измерение объема и скорости дыхательных движений с помощью датчиков, размещенных на грудной клетке и животе. При анализе ЧД часто наблюдалось, что особенности изменений пневмограммы терялись, т. е. имеется ограниченная информативность измерений при оценке изменений в регулярности дыхательного ритма. В связи с отсутствием информативного количественного измерения уровня аритмии дыхания интерес ученых к пневмографии постепенно снижался, и внимание исследователей было направлено на альтернативные методы измерения и анализа ЧД [3].

Другим из наиболее распространенных контактных методов измерения ЧД является спирометрия, которая основана на измерении объема и скорости воздушного потока при дыхании. Этот метод является стандартным для диагностики различных заболеваний легких и оценки их тяжести. Однако спирометрия может быть затруднительной при мониторинге в реальном времени, особенно у пациентов с ограниченной подвижностью или в состоянии стресса. Такие устройства характеризуются высокой устойчивостью к внешним воздействиям и отличной устойчивостью к артефактам движения человеческого тела, что обеспечивает актуальность их применения в различных областях, включая спортивную медицину. Однако такие измерения трудоемки в обработке, а сами устройства могут оказаться громоздкими или неустойчивыми для использования вне медицинских учреждений [1].

Третий метод – реография, который измеряет изменения сопротивления тканей в процессе

дыхания. Этот метод основывается на электропроводимости тканей и может быть полезен при оценке дыхательной функции, особенно у детей и новорожденных. Однако реография может быть менее точной, чем другие методы и подвергаться внешним воздействиям, таким как движения пациента или окружающей среды.

Помимо описанных методов определения частоты дыхательных движений (ЧДД) стоит отметить возможность использования для этой цели электрокардиографии (ЭКГ). Способ оценки ЧД по сигналам ЭКГ указывает на существование взаимосвязи между фазами сердечного цикла и ЧДД. Применение таких методов позволяет точно определить фазы сердечного цикла, а следовательно, и ЧДД. К недостаткам такой высокоточной системы, относительная погрешность которой может составлять от 1 до 3 %, относятся такие факторы, как чувствительность системы к артефактам движений пациента и высокая стоимость оборудования [1, 4].

В современных исследованиях все больше внимания уделяется разработке и применению бесконтактных методов оценки различных биологических показателей с использованием видеоанализа в режиме реального времени и постобработки данных. Эти подходы позволяют расширить перспективы клинических исследований, улучшить точность измерений и прогнозировать развитие неблагоприятных клинических состояний [1, 5–11]. К этой группе методов относится видеоанализ, в том числе безмаркерные системы захвата движения. Но обработка видеоряда представляет собой процесс, требующий значительных временных и вычислительных ресурсов и ориентированный на решение конкретной задачи. Перспективным представляется применение маркерных систем захвата движения, которые предоставляют возможность оптимизировать использование ресурсов, позволяют решать широкий спектр задач и обеспечивают более гибкую альтернативу для мониторинга исследования физиологических параметров пациентов.

Предшествующие зарубежные исследования, направленные на сопоставление результатов измерений, полученных с использованием маркерных систем захвата движений, с данными, полученными с помощью инструментов,

применяемых в медицинской практике, таких как спирометрия и пневмография, выявили минимальные расхождения, не превышающие 3 % [12–14]. Эти результаты свидетельствуют о высокой точности маркерных систем захвата движений в контексте оценки параметров дыхания, что позволяет выделить маркерные системы захвата движений как потенциально ценный инструмент для определения параметров дыхания в клинической практике.

Основной целью данного исследования была разработка эффективного алгоритма измерения параметров дыхания с применением современных технических и инструментальных средств, а именно определение ЧД пациента с использованием маркерной системы захвата движений. Такой методологический подход позволяет определить параметры дыхания, обеспечивая медицинскому персоналу важную информацию для диагностики, мониторинга и реабилитации пациентов с нарушениями дыхательной функции.

Техническое обеспечение исследования. Захват движения – это процесс записи движения объектов или людей. С применением маркерной системы захвата "Qualisys" регистрировались светоотражающие маркеры 12.5 мм с частотой 100 Гц камерами [15]. В работе были использованы 10 инфракрасных камер Oqus 500+ (Qualisys AB, Гетеборг, Швеция) с дистанцией измерений до 25 м, частотой до 360 кадров в секунду и максимальным разрешением 4 МП.

В качестве эталонной системы была использована спирометрическая капсула (ADInstruments Pty Ltd., Bella Vista, Австралия) в комбинации с системой устройств регистрации биологических сигналов PowerLab C и их усиления Octal Bio Amp. Перед началом эксперимента система была откалибрована, что обеспечило корректное определение пространственных координат движения маркеров в ходе исследования.

С целью одновременной фиксации видеоизображения и данных, получаемых от спирометра, был применен триггер – кнопка, подключенная к блоку синхронизации обеих систем. Этот инструмент обеспечивает запись видео и регистрацию респираторных параметров одновременно, что позволяет проводить анализ двух типов данных в соответствующих

временных интервалах для точной оценки исследовательских результатов.

Проведение эксперимента. В исследовании приняли участие 8 человек (2 женщины и 6 мужчин) в возрасте 23 лет. Добровольцы не имели никаких осложнений, связанных с дыханием или другими заболеваниями, и были полностью здоровыми на момент проведения эксперимента. Данный факт обеспечил надежность и достоверность данных, полученных в ходе исследования, и исключил влияние возможных факторов, связанных с заболеваниями или патологиями, на результаты эксперимента.

Отслеживание дыхательных процессов было осуществлено с применением трех различных положений тела: стоя, сидя и лежа. Длительность эксперимента для каждого участника включала запись данных в течение 100 с.

Маркеры располагались на теле испытуемых на животе, ребрах и груди (рис. 1). Эти места были выбраны с целью обнаружения гармонических колебаний, связанных с ЧД. Описание нумерации маркеров представлено в табл. 1.

В результате выполнения эксперимента были получены файлы видеозаписи, содержащие информацию о движениях маркеров в формате qtm (Qualisys Track Manager). В приложении Qualisys Track Manager (QTM) файлы видеозаписи были преобразованы в формат mat, совместимый с программным обеспечением MATLAB. Эти файлы представляют собой структуру данных, содержащую информацию о дате записи, количестве кадров, частоте регистрации, а также о названиях маркеров и траекториях их движения относительно начала координат.

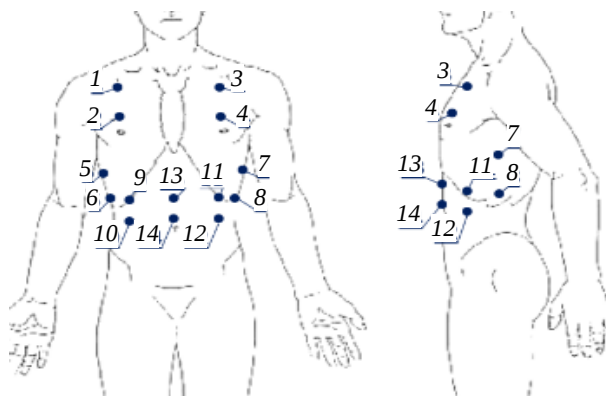


Рис. 1. Размещение маркеров на теле человека

Fig. 1. Placement of markers on the human body

Табл. 1. Обозначения маркеров

Tab. 1. Marker designations

№	Имя	Расположение
1	R_Breast_1	На 2...3 см проксимальнее R_Breast_2
2	R_Breast_2	Справа от средней ключичной линии на уровне четвертого ребра
3	L_Breast_1	На 2...3 см проксимальнее L_Breast_2
4	L_Breast_2	Слева от средней ключичной линии на уровне четвертого ребра
5	R_Rib_1	На 2...3 см проксимальнее R_Rib_2
6	R_Rib_2	Подреберная область с правой стороны
7	L_Rib_1	На 2...3 см проксимальнее L_Rib_2
8	L_Rib_2	Подреберная область с левой стороны
9	R_Belly_1	На 2...3 см проксимальнее R_Belly_2
10	R_Belly_2	Правая боковая область мезогастрия
11	L_Belly_1	На 2...3 см проксимальнее L_Belly_2
12	L_Belly_2	Левая боковая область мезогастрия
13	Belly_Middle_1	На 2...3 см проксимальнее Belly_Middle_2
14	Belly_Middle_2	Выше пупка

Результатом регистрации спирометрических данных являлись записи, сохраненные в формате ADICHT. Файлы ADICHT представляют собой формат данных, используемый для записи и последующего анализа биологических сигналов. Данные были записаны с частотой 1000 Гц, и представленные в них значения являются измерениями потока воздуха в литрах в секунду [л/с]. Данная единица измерения используется для количественной оценки скорости потока воздуха или газа, пропускаемого через спирометр во время проведения тестирования.

Алгоритмы обработки и анализа измерений. В связи с разнообразием и сложностью данных, получаемых от системы захвата движений, требовалась разработка специализированного алгоритма обработки, который мог бы эффективно извлекать информацию о параметрах дыхания из большого количества экспериментов. Алгоритм обработки и анализа измерений был разбит на две части: первый – выполнял вычисление параметров дыхания, а второй – позволял определить оптимальное местоположение маркеров для конкретного положения тела.

Алгоритм обработки измерений параметров внешнего дыхания с использованием системы захвата движений

Algorithm for Processing Measurements of External Respiration Parameters Using Motion Capture Systems

Алгоритм I. На рис. 2 представлен алгоритм обработки измерений для определения ЧД, который включает следующие основные этапы:

1. Извлечение и структурирование данных, содержащихся в исходных массивах. Фильтры нижних частот (ФНЧ) применяются с целью подавления высокочастотных компонентов сигнала и подавления постоянной составляющей, а также удаления шумов, которые могли бы оказать влияние на результаты анализа.

2. Выбор положения тела. В работе исследуются параметры дыхания в трех основных позах – лежа, стоя и сидя. Обработка результатов по каждому из них выполняется отдельно.

3. Выбор местоположения маркеров. В эксперименте маркеры разделены на 4 основные категории в зависимости от расположения на теле: грудь, ребра, центр и периферия живота.

4. Вычисление частот, полученных с маркеров и опорного (со спирометра) сигналов:

4.1. Определение длины N последовательности сигнала $x_1, x_2, \dots, x_N$.

4.2. Вычисление вектора частот. Вычисление частоты для каждого элемента дискретного преобразования Фурье (ДПФ) сигнала по формуле

$$f_k = \frac{kf_s}{N},$$

где k – индекс элемента ДПФ; f_s – частота дискретизации, Гц; N – количество отсчетов в сигнале.

4.3. Применение ДПФ к сигналу. Преобразование временной последовательности x в частотную область. Результатом является массив комплексных амплитуд для каждой частоты Y_k :

$$Y_k = \sum_{n=1}^N x_n e^{-i2\pi kn/N},$$

где Y_k – k -й комплексный коэффициент в частотной области; x_n – n -й элемент во временной области; i – мнимая единица; $k = 1, 2, \dots, N$ – индекс частоты.

4.4. Определение индекса максимального значения амплитуды:

$$idx = \max |Y_k|.$$

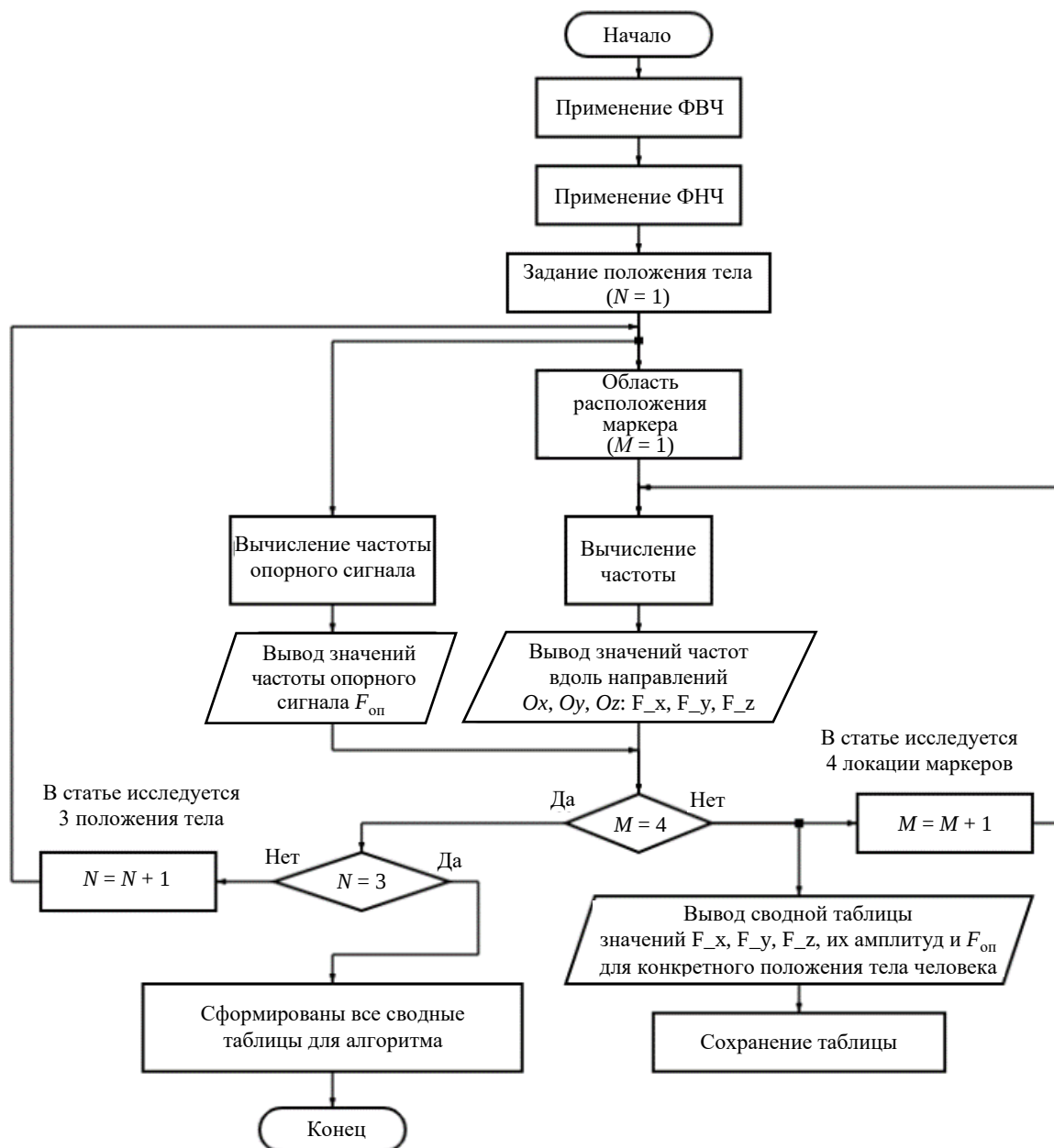


Рис. 2. Алгоритм I

Fig. 2. Algorithm I

4.5. Вычисление максимальной частоты [уд/мин]:

$$F = \text{round}(60 f_{k_{idx}}).$$

Максимальная частота F в минутах определяется умножением частоты f_k на индекс максимального значения ДПФ с последующим округлением до целого числа. Поскольку входные данные представляют собой частоту в герцах, исходное значение умножается на 60 для преобразования в количество ударов в минуту.

Окно для наблюдения текущих сигналов и соответствующих им амплитудных спектров представлено на рис. 3.

5. Получение сводной таблицы для последующего анализа.

Алгоритм II. На рис. 4 представлен алгоритм анализа и определения предпочтительного расположения датчиков на теле человека при конкретной позе. Работа с данными эксперимента включала следующие этапы:

1. Выбор положения тела. В работе проводится

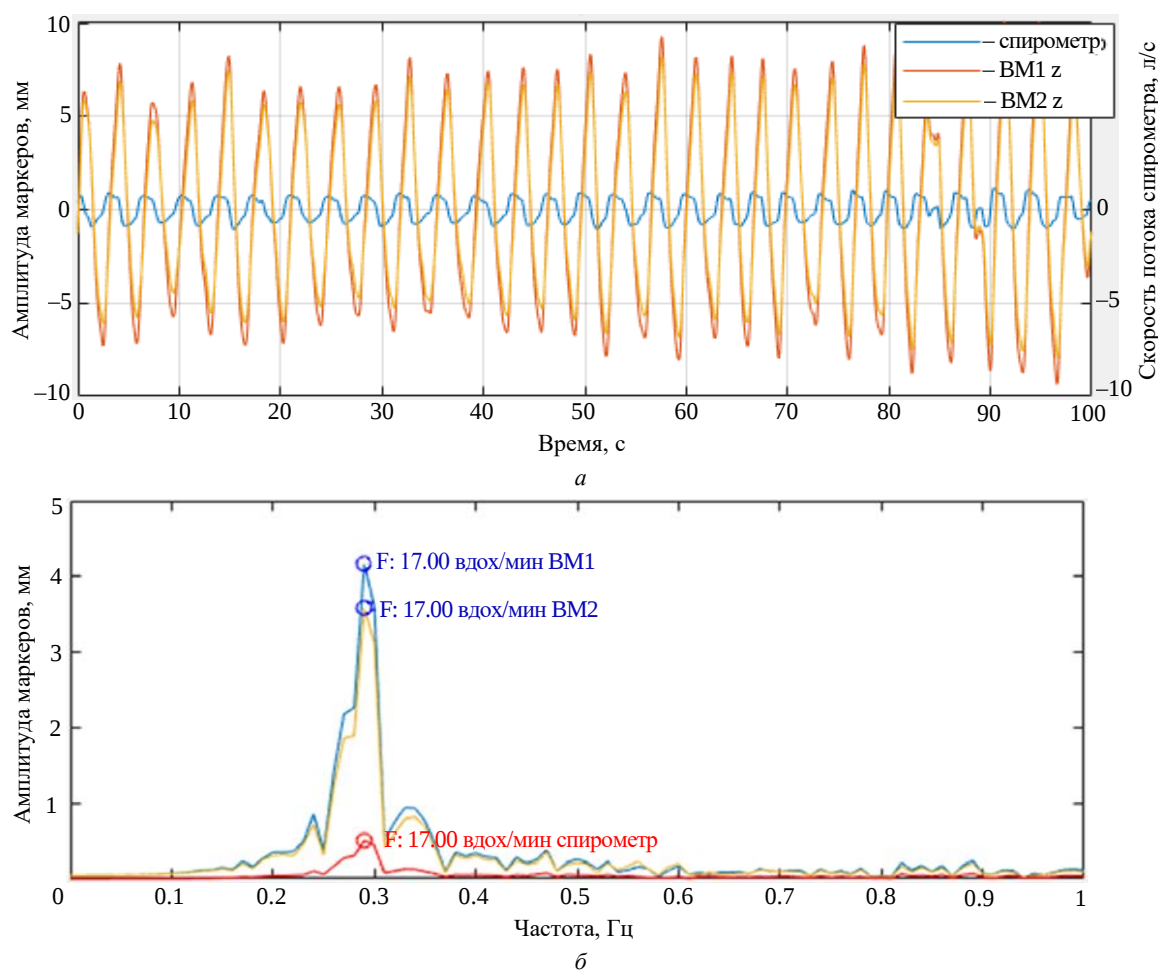


Рис. 3. Колебания маркеров и амплитудные спектры кривых в положении лежа у 3-го испытуемого: *a* – колебания маркеров "Belly Middle 1" и "Belly Middle 2" в проекции на вертикальную ось *z* и кривая спирографии; *б* – амплитудные спектры кривых

Fig. 3. Marker fluctuations and amplitude spectra of curves in the supine position in the 3rd subject: *a* – fluctuations of "Belly Middle 1" and "Belly Middle 2" markers in projection on the vertical *z*-axis and spirometry curve; *б* – amplitude spectra of curves

исследование параметров дыхания в трех основных позах – лежа, стоя и сидя. Обработка результатов по каждому из них проводилась отдельно.

2. Формирование таблиц данных, полученных в результате работы алгоритма I. Результаты алгоритма I формируются в соответствующие массивы, обозначаемые "data_N", где N – условный номер положения тела: 1 – лежа, 2 – сидя, 3 – стоя.

3. Поиск максимальной амплитуды дыхания для каждой области тела.

4. Поиск максимальной амплитуды дыхания между исследуемыми сегментами.

5. Формирование итогового массива данных "data_N_analysis".

6. Определение патологии дыхания с учетом положения тела. В исследовании тип дыхания определяется среди трех основных групп: брадипноэ, нормальное дыхание и тахипноэ.

Брадипноэ – это медицинский термин, который обозначает замедленную ЧД у человека. Это состояние характеризуется уменьшенной частотой вдохов и выдохов по сравнению с нормой для данного возраста и состояния здоровья. При таком типе патологии частота составляет от 12 и менее дыхательных движений в минуту [16, 17].

Нормальное дыхание – это процесс, при котором человек равномерно и комфортно вдыхает и выдыхает воздух, обеспечивая достаточное поступление кислорода в организм и выведение углекислого газа из легких. Взрослый человек в покое обычно дышит примерно 12–20 раз в минуту [18].

Тахипноэ – означает увеличенную ЧД у человека. В этом состоянии человек чаще, чем обычно, вдыхает и выдыхает воздух. Увеличение частоты дыхания до 20 и более вдохов в минуту может рассматриваться как тахипноэ [16–18].

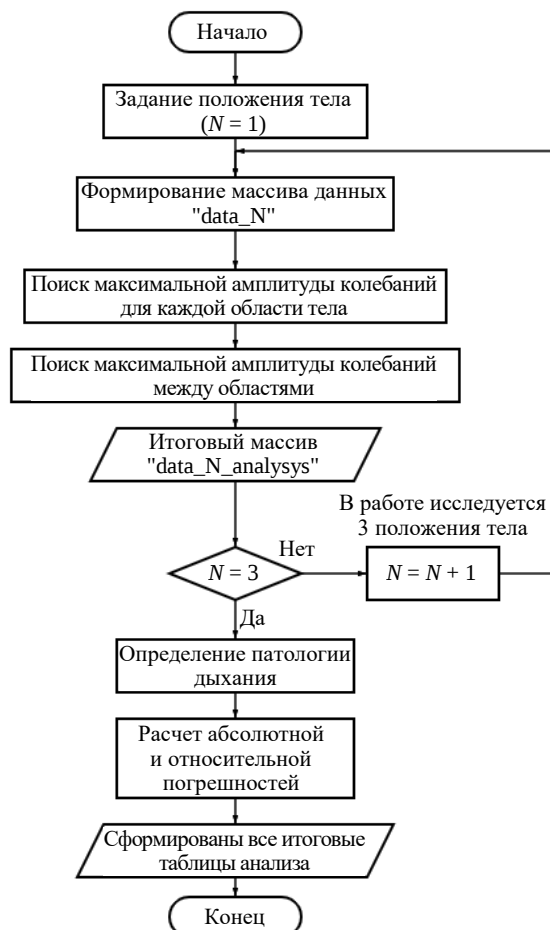


Рис. 4. Алгоритм II

Fig. 4. Algorithm II

Табл. 2. Типы дыхания

Tab. 2. Breathing types

Тип дыхания	Частота, вдох/мин		
	Стоя	Сидя	Лежа
Брадипноэ	<12	<12	<12
Нормальное дыхание	12–20	12–18	12–16
Ахипноэ	>20	>18	>16

Табл. 3. Результаты обработки для всех испытуемых в положении лежа для области в центре живота

Tab. 3. Results for all subjects in the supine position for the area in the center of the abdomen

Маркер	F_x , вдох/мин	A_x , мм	F_y , вдох/мин	A_y , мм	F_z , вдох/мин	A_z , мм	$F_{\text{спиро}}$, вдох/мин
Belly Midle test 1	17	1.74	17	0.98	17	9.8	17
Belly Midle test 2	16	2.17	16	0.73	16	10.12	16
Belly Midle test 3	17	1.39	17	0.94	17	9.37	17
Belly Midle test 4	25	1.97	25	0.58	25	10.07	25
Belly Midle test 5	14	1.13	14	0.67	14	9.39	14
Belly Midle test 6	18	0.89	18	0.7	18	9.71	18
Belly Midle test 7	18	1.14	18	0.66	18	9.06	18
Belly Midle test 8	24	1.13	24	0.64	24	9.3	24

Положение тела также влияет на диапазон нормальной ЧД [18]. Поэтому тип дыхания определяется согласно табл. 2, где верхняя граница нормальной ЧД изменяется в зависимости от положения тела.

Результаты обработки экспериментальных данных. Результатом работы алгоритма I являются 12 таблиц формата *xlsx* (табл. 3), содержащих информацию о частотах вдохов в минуту и амплитудах колебаний маркеров в миллиметрах в проекции на оси Ox , Oy , Oz , а также о дыхательном ритме вдохов в минуту, полученном со спирометра. Количество таблиц определяется комбинацией трех положений тела и четырех областей расположения маркеров.

В ходе выполнения алгоритма II формируются три итоговых массива "data_N_analysys", как представлено в табл. 4.

Исходя из результатов эксперимента было обнаружено, что наибольшие значения амплитуд наблюдаются в положении лежа датчиков "Belly Middle" и составляют в среднем 9.6 мм, в то время как более низкие значения характерны для положений "стоя" и "сидя" по 7.5 мм и 6.9 мм соответственно.

Нормальный тип дыхания преобладает в большинстве случаев, но также отмечаются случаи тахипноэ. Этот факт объясняется необходимостью прикладывать определенные усилия, связанными с применением спирометра, что могло нарушить обычный для них ритм дыхания. Случаев замедленного дыхания обнаружено не было.

Закключение. В ходе проведения эксперимента были исследованы характеристики дыхательных процессов у испытуемых в различных положениях

Табл. 4. Результаты анализа в положении лежа

Tab. 4. Results in the supine position

№ испыт.	F, вдох/мин	A, мм	Ось	Область	F _{спиро} , вдох/ мин	Тип дыхания	ΔF	δF
1	17	9.80	z	Belly Middle	17	Тахипноэ	0	0
2	16	10.12	z	Belly Middle	16	Норм. дыхание	0	0
3	17	9.37	z	Belly Middle	17	Тахипноэ	0	0
4	25	10.07	z	Belly Middle	25	Тахипноэ	0	0
5	14	9.39	z	Belly Middle	14	Норм. дыхание	0	0
6	18	9.71	z	Belly Middle	18	Тахипноэ	0	0
7	18	9.06	z	Belly Middle	18	Тахипноэ	0	0
8	24	9.30	z	Belly Middle	24	Тахипноэ	0	0

тела с использованием маркерного видеоанализа и спирометрии. Максимальное расхождение в расчетах между двумя методами было равно 1 вдох/мин, что является максимальным расхождением и было обнаружено только в одном случае – у третьего добровольца в положении стоя.

Полученные результаты подчеркивают важность учета положения тела при анализе пара-

метров дыхания и демонстрируют перспективность маркерного видеоанализа в исследованиях этой области. Дальнейшие исследования могут быть направлены на вычисление ЧДД и других параметров дыхания в условиях физической активности с целью разработки эффективных методов диагностики дыхательных нарушений с использованием систем захвата движения.

Авторский вклад

Дроздова Алёна Васильевна – сбор данных; разработка и реализация алгоритма; написание статьи.

Ткаченко Анна Николаевна – постановка задачи; руководство научным исследованием.

Скребова Елена Михайловна – настройка оборудования; сбор данных.

Сакун Иван Антонович – сбор данных; анализ результатов.

Author's contribution

Alyona V. Drozdova, data collection; algorithm design and implementation; article writing.

Anna N. Tkachenko, problem statement; management of scientific research.

Elena M. Skrebova, equipment setup; data collection.

Ivan A. Sakun, data collection; analysis of results.

Список литературы

1. Контактные способы регистрации частоты дыхания: возможности и перспективы / А. А. Гаранин, А. О. Рубаненко, И. Д. Шипунов, В. С. Рогова // Бюл. физиологии и патологии дыхания. 2023. № 89. С. 159–173. doi: 10.36604/1998-5029-2023-89-159-173

2. Бесконтактные методы измерения частоты дыхания: (обзор литературы) / А. А. Гаранин, И. Д. Шипунов, А. О. Рубаненко, Н. О. Санникова // Вестн. новых медицинских технологий. Электронное изд. 2023. № 5. С. 64–72. doi: 10.24412/2075-4094-2023-5-1-9

3. Вагин Ю. Е. Неравномерность ритма дыхания как показатель эмоционального напряжения // Сеченовский вестн. 2015. № 2(20). С. 13–23.

4. Уткина А. В., Изотова А. Г., Литвинова Н. А. Алгоритм оценки частоты дыхания по сигналу ЭКГ // Modern science. 2020. № 5–1. С. 451–421.

5. Анализ видеоизображения человека для определения частоты его дыхания / К. С. Пуртов, П. А. Соколов, М. Б. Конторович, А. В. Чистяков, В. Б. Костоусов, В. С. Кубланов // Вторая науч.-техн. конф. молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, 15–19 мая 2017. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 393–396.

6. A real-time camera-based adaptive breathing monitoring system / Yu-Ching Lee, Abdan Syakura, Muhammad Adil Khalil, Ching-Ho Wu, Yi-Fang Ding, Ching-Wei Wang // Medical & Biological Engineering & Computing. 2021. Vol. 59(6). P. 1285–1298. doi: 10.1007/s11517-021-02371-5

7. Marek Bartula, Timo Tigges, Jens Muehlsteff. Camera-Based System for Contactless Monitoring of Respiration // 35th Annual Intern. Conf. of the IEEE EMBS, Osaka, Japan, 3–7 July 2013. IEEE, 2013. P. 2672–

2675. doi: 10.1109/embc.2013.6610090

8. Jagadev P., Giri Li. Human respiration monitoring using infrared thermography and artificial intelligence // Biomed Phys Eng Express. 2020. Vol 6, iss. 3. P. 1–19. doi:10.1088/2057-1976/ab7a54

9. Сравнительный анализ контактных и бесконтактных технических решений мониторинга физиологических сигналов человека / В. В. Савченко, Д. А. Суздальцев, В. А. Королев, Д. Ю. Комраков // Биотехносфера. 2014. № 1–2 (31–32). С. 18–23.

10. Термографическая визуализация и анализ изображений динамических процессов в области лица / И. А. Знаменская, Е. Ю. Коротева, А. В. Халин, В. В. Шишаков, С. А. Исайчев, А. М. Черноризов // Вестн. Моск. ун-та. 2017. № 6. С. 88–93. doi: 10.3103/S002713491706025X

11. Пат. RU 2684044 C1 A61B 5/1455 (2006.01). Устройство и способ для определения основных показателей жизнедеятельности субъекта / Герард Де Хан, Н. В. Филипс Конинклеке; опубл. 03.04.2019. Бюл. № 10.

12. Massaroni C., Cassetta E., Silvestri S. A Novel Method to Compute Breathing Volumes via Motion Capture Systems: Design and Experimental Trials // J. Appl. Biomech. 2017. Vol. 33, iss. 5. P. 361–365. doi: 10.1123/jab.2016-0271

13. Shafiq G., Veluvolu K. C. Multimodal chest surface motion data for respiratory and cardiovascular monitoring applications // Scientific data. 2017. № 4. Art. num. 170052. doi: 10.1038/sdata.2017.52

14. Efficacy of Marker-Based Motion Capture for Respiratory Cycle Measurement: A Comparison with Spirometry / N. D. Shamantseva, T. A. Klishkovskaia, S. S. Ananyev, A. Y. Aksenov, T. R. Moshonkina // Sensors. 2023. Vol. 23, iss. 24. Art. num. 9736. doi: 10.3390/s23249736

15. Qualisys. Motion Capture Technology and Systems. URL: <https://www.qualisys.com/> (дата обращения: 21.03.2024).

16. Уткина А. В., Изотова А. Г., Литвинова Н. А. Современное состояние проблемы частоты дыхания // Сб. ст. XX Междунар. науч.-практ. конф. European scientific confe. Пенза, 17 мая 2020. Пенза: Наука и просвещение, 2020. С. 279–281.

17. Копейкин Р. Е., Князева Е. Д. Классификация аномалий дыхания на основе нейросетевого подхода // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2022. № 12. С. 152–155.

18. Евсеева И. Л. Определение частоты дыхательных движений. URL: <https://infourok.ru/prezentaciya-issledovanie-chastoti-dihatelnih-dvizheniy-1453941.html?ysclid=lu1kf0w9nf957399749> (дата обращения: 21.03.2024).

Информация об авторах

Дроздова Алёна Васильевна – студентка магистратуры по направлению "Системы захвата и моделирования движения", программист НИЛ СЗМД Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка измерительной информации; биомеханический анализ.

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

E-mail: alyona_ch@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0001-9350-4448>

Ткаченко Анна Николаевна – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – системы измерения факторов ориентации и навигации; обработка измерительной информации; инерциальные датчики.

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

E-mail: antkachenko@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4706-4859>

Скребова Елена Михайловна – младший научный сотрудник НИЛ СЗМД Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 3 научных публикаций. Сфера научных интересов – обработка измерительной информации; биомеханический анализ.

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

E-mail: emskrebova@etu.ru

Сакун Иван Антонович – студент магистратуры по направлению "Системы захвата и моделирования движения", программист НИЛ СЗМД Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – обработка измерительной информации; биомеханический анализ.

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

E-mail: sakun_228@mail.ru

References

1. Garanin A. A., Rubanenko A. O., Shipunov I. D., Rogova V. S. Contact Methods for Registering Respiratory Rate: Opportunities and Perspectives. *Bulletin Physiology and Pathology of Respiration*. 2023, no. 89, pp. 159–173. doi: 10.36604/1998-5029-2023-89-159-173 (In Russ.)
2. Garanin A. A., Shipunov I. D., Rubanenko A. O., Sannikova N. O. Methods of Non-Contact Respiratory Rate Measurement: (Literature Review). *J. of New Medical Technologies, eEdition*. 2023, no. 5, pp. 64–72. doi: 10.24412/2075-4094-2023-5-1-9 (In Russ.)
3. Vagin Yu. E. The Unevenness of Respiratory Rhythm as an Indicator of Emotional Stress. *Sechenov Medical J*. 2015, no. 2(20), pp. 13–23. (In Russ.)
4. Utkina A. V., Izotova A. G., Litvinova N. A. Algorithm of Respiration Rate Estimation by ECG Signal. *Modern Science*. 2020, no. 5–1, pp. 451–421. (In Russ.)
5. Purtov K. S., Sokolov P. A., Kontorovich M. B., Chistyakov A. V., Kostousov V. B., Kublanov V. S. Preliminary Study of Video-Based Respiratory Rate Assessment. 2nd Scientific and Tech. Conf. of Young Scientists of the Ural Energy Institute, Ekaterinburg, 15–19 May, 2017. Ural Federal University. Ekaterinburg, 2017, pp. 393–396. (In Russ.)
6. Yu-Ching Lee, Abdan Syakura, Muhammad Adil Khalil, Ching-Ho Wu, Yi-Fang Ding, Ching-Wei Wang. A Real-Time Camera-Based Adaptive Breathing Monitoring System. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2021, vol. 59 (6), pp. 1285–1298. doi: 10.1007/s11517-021-02371-5
7. Marek Bartula, Timo Tigges, Jens Muehlsteff. Camera-Based System for Contactless Monitoring of Respiration. 35th Annual Intern. Conf. of the IEEE EMBS, Osaka, Japan, 3–7 July 2013. IEEE, 2013, pp. 2672–2675. doi: 10.1109/embs.2013.6610090
8. Jagadev P, Giri LI. Human Respiration Monitoring Using Infrared Thermography and Artificial Intelligence. *Biomed Phys Eng Express*. 2020, vol. 6, iss. 3, pp. 1–19. doi:10.1088/2057-1976/ab7a54
9. Savchenko V. V., Suzdaltsev D. A., Korolev V. A., Komrakov D. Yu. Comparative Analysis of Contact and Noncontact Technologies for Human Physiological State Monitoring. *Biotechnosphere*. 2014, no. 1–2 (31–32), pp. 18–23. (In Russ.)
10. Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Yu., Khakhalin A. V., Shishakov V. V., Isaichev S. A., Chernorizov A. M. Infrared Thermography and Image Analysis of Dynamic Processes around the Facial Area. *Moscow University Physics Bulletin*. 2017, no. 72, pp. 595–600. doi: 10.3103/s002713491706025x
11. De Khan Gerard, Koninklijke Filips N. V. Device and Method for Determining Vital Signs of Subject. Patent RF, no. 2684044, 2019. (In Russ.)
12. Massaroni C, Cassetta E, Silvestri S. A Novel Method to Compute Breathing Volumes via Motion Capture Systems: Design and Experimental Trials. *J Appl Biomech*. 2017, vol. 33, no. 5, pp. 361–365. doi: 10.1123/jab.2016-0271
13. Shafiq G., Veluvolu K. C. Multimodal Chest Surface Motion Data for Respiratory and Cardiovascular Monitoring Applications. *Scientific data*. 2017, no. 4, art. num. 170052. doi:10.1038/sdata.2017.52
14. Shamantseva N. D., Klishkovskaia T. A., Ananyev S. S., Aksenov A. Y., Moshonkina T. R. Efficacy of Marker-Based Motion Capture for Respiratory Cycle Measurement: A Comparison with Spirometry. *Sensors*. 2023, vol. 23, iss. 24, art. num. 9736. doi: 10.3390/s23249736
15. Qualisys. Motion Capture Technology and Systems. Available at: <https://www.qualisys.com/> (accessed: 21.03.2024).
16. Utkina A. V., Izotova A. G., Litvinova N. A. Current State of the Respiratory Rate Problem. *Proc. of European Scientific Conf., Penza, 17 May 2020. Penza, Science and Enlightenment*, 2020, pp. 279–281. (In Russ.)
17. Kopeykin R. E., Kniazeva E. D. The Application of Neural Networks to the Respiratory Anomaly Classification. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2022, no. 12, pp. 152–155. (In Russ.)
18. Evseeva I. L. Determination of the Frequency of Respiratory Movements. Available at: <https://infourok.ru/prezentaciya-issledovanie-chastoti-dihatelnih-dvizheniy-1453941.html?ysclid=lu1kf0w9nf957399749> (accessed: 21.03.2024). (In Russ.)

Information about the authors

Alyona V. Drozdova, Master's student in Motion Capture and Modeling Systems, programmer of the Research Laboratory of NWMD of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: processing of measurement information; biomechanical analysis.

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

E-mail: alyona_ch@bk.ru

<https://orcid.org/0009-0001-9350-4448>

Anna N. Tkachenko, Cand. Sci. (2010) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 40 scientific publications. Area of expertise: systems of measurement of orientation and navigation factors; processing of measurement information; inertial sensors.

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

E-mail: antkachenko@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4706-4859>

Elena M. Skrebova, Junior researcher of the NWMD Research Laboratory of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: processing of measurement information; biomechanical analysis.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: emskrebova@etu.ru

Ivan A. Sakun, Master's degree student in Motion Capture and Modeling Systems, programmer of the NWMD Research Laboratory of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: processing of measurement information; biomechanical analysis.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: sakun_228@mail.ru

Метод подбора комбинаций оптических хемосенсорных материалов для идентификации парофазных экотоксикантов

Р. Д. Чувашов ✉

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

✉ chuva.rd.13@gmail.com

Аннотация

Введение. Загрязнение окружающей среды является важной проблемой для общественной и экологической безопасности. Для экспресс-контроля экотоксикантов в паровой фазе применяются кросс-реактивные оптические хемосенсорные материалы, комбинации которых позволяют идентифицировать обнаруженные вещества. Подбор комбинаций хемосенсоров, с помощью которых возможна наиболее надежная идентификация веществ, редко рассматривается исследователями; вместо этого часто используются все доступные хемосенсорные материалы, хотя меньшая по размеру комбинация может быть более надежной и информативной.

Цель работы. Предложить метод подбора комбинаций хемосенсорных материалов, позволяющий составить из набора доступных хемосенсорных материалов комбинацию, наиболее подходящую для идентификации установленной группы парофазных веществ.

Материалы и методы. Предложена метрика качества комбинации для задачи идентификации, численно описывающая степень ортогональности и близость распределений векторов отклика комбинации на воздействие веществ. На основе метрики сформулирован метод подбора комбинаций. Предложенный метод апробирован на примере подбора комбинации проницаемых флуоресцентных хемосенсорных материалов, выполняющей идентификацию насыщенных паров нитроароматических экотоксикантов и веществ-помех. Идентификация веществ по отклику комбинации материалов на воздействие паров веществ выполнена классификационными моделями на основе метода опорных векторов и метода главных компонент.

Результаты. Определена комбинация проницаемых флуоресцентных хемосенсорных материалов, наиболее надежная для решения задачи идентификации паров нитроароматических экотоксикантов и веществ-помех. Показана возможность скорой идентификации веществ в ходе воздействия на материалы. Показано, что метрика качества ниже для комбинации из всех доступных флуоресцентных хемосенсорных материалов в сравнении с меньшей по размеру комбинацией материалов, подобранной предложенным методом.

Заключение. Предложен подход к решению проблемы подбора оптимальной комбинации хемосенсорных материалов для решения задачи идентификации установленной группы веществ. Показано, что подбор комбинации материалов предлагаемым методом позволяет повысить надежность идентификации веществ и сократить количество разнородных хемосенсорных материалов в комбинации.

Ключевые слова: флуоресцентные хемосенсорные материалы, подбор комбинаций, идентификация, нитроароматические экотоксиканты

Для цитирования: Чувашов Р. Д. Метод подбора комбинаций оптических хемосенсорных материалов для идентификации парофазных экотоксикантов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 103–116. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-103-116

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РЦНИ (РФФИ) в рамках научного проекта № 20-37-90108.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность за ценные замечания и поддержку при подготовке рукописи д. х. н. Егору Владимировичу Вербицкому, к. т. н. доц. Анне Александровне Барановой, к. ф.-м. н. доц. Константину Олеговичу Хохлову.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.07.2024; принята к публикации после рецензирования 30.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Method for Selecting Combinations of Optical Chemosensory Materials for Identification of Vapor-Phase Ecotoxics

Roman D. Chuvashov ✉

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

✉ chuva.rd.13@gmail.com

Abstract

Introduction. Environmental pollution represents a serious threat to the public and ecological safety. Cross-reactive optical chemosensor materials and their combinations can be effectively used for timely identification of ecotoxics in the vapor phase. The selection of chemosensor combinations for a reliable identification of toxic substances has received insufficient research attention. As a rule, all available chemosensor materials are used, although a smaller combination may be more reliable and informative.

Aim. To propose a method for selecting from a set of available chemosensory materials the optimal combination most suitable for identification of the required group of vapor-phase substances.

Materials and methods. A metric for assessing the quality of a chemosensor material combination for identification of toxic substances is proposed. This metric numerically describes the degree of orthogonality and the proximity of distributions of response vectors of the combination to the exposure to analyzed substances. On the basis of the metric, a method for selecting optimal combinations is formulated. Classification models based on the support vector method and the principal components method are used to classify responses of the combination of materials. The proposed method is tested on the example of selecting combinations of permeable fluorescent materials for identification of saturated vapor-phase nitroaromatic ecotoxics and interfering substances.

Results. A combination of permeable fluorescent materials, sufficiently reliable for identification of vapor-phase nitroaromatic ecotoxics, was determined. The possibility of rapid identification of toxic substances during the prolonged exposure of materials to their vapors is presented. It is shown that the quality metric is lower for a combination of all available fluorescent materials compared to a smaller combination selected via the proposed method.

Conclusion. An approach to solving the problem of finding an optimal combination of chemosensory materials for identification of the specified group of substances is proposed. The proposed method increases the reliability of identification of toxic substances while reducing the number of chemosensory materials involved in the process.

Keywords: fluorescent chemosensory materials, selection of combinations, identification, nitroaromatic ecotoxics

For citation: Chuvashov R. D. Method for Selecting Combinations of Optical Chemosensory Materials for Identification of Vapor-Phase Ecotoxics. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 103–116. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-103-116

Source of funding. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-37-90108.

Acknowledgements. The author expresses deep gratitude for the valuable comments and support during the preparation of the manuscript to Dr Sci. (Chem.) E. V. Verbitskiy, Cand. Sci. (Eng.) A. A. Baranova, Cand. Sci. (Phys.-Math.) K. O. Khokhlov.

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

Submitted 01.07.2024; accepted 30.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. Проблема загрязнения окружающей среды является важной для общественной и экологической безопасности. Это делает необходимым контроль экотоксикантов – химических соединений и веществ, обладающих

токсическими свойствами. В частности, нитроароматические соединения, применяемые для промышленного производства полимеров и красителей, высокотоксичны и канцерогенны [1], а соединения с несколькими нитрогруппами

благодаря своим энергетическим свойствам широко применяются для изготовления взрывчатых составов [2, 3]. Неразрушающий контроль присутствия следов этих веществ, которые могут быть представлены в виде твердых частиц, компонентов растворов и паров в воздухе, необходим для экологического мониторинга и организации безопасности [4]. Недолговечность следов веществ из-за испарения, разбавления и деструкции требует оперативного анализа на месте [5]. Это делает актуальными методы и оборудование внелабораторного экспресс-контроля экотоксикантов, который может быть менее чувствительным в сравнении с прецизионными лабораторными методами, но лучше подходит для экспресс-мониторинга благодаря оперативности, практичности и простоте использования.

Одной из современных тенденций в разработке экспресс-методов детектирования экотоксикантов в паровой фазе является применение хемосенсорных материалов, которые при взаимодействии с определяемым веществом изменяют свои оптические или электрохимические свойства. В частности, флуоресцентный метод широко используется для обнаружения паров экотоксикантов и позволяет создавать портативные устройства экспресс-контроля [6–9]. Основа флуоресцентного метода – флуоресцентные хемосенсорные соединения, называемые "флуорофорами", которые изменяют параметры своей флуоресценции при контакте с молекулами других веществ. Наиболее часто применяется регистрация изменения интегральной интенсивности стационарной флуоресценции, а наиболее частым откликом на воздействие нитроароматических соединений является уменьшение интегральной интенсивности флуоресценции, так называемое тушение флуоресценции. Для практического применения флуоресцентных хемосенсоров на их основе формируют твердофазные флуоресцентные сенсорные материалы, что значительно упрощает конструкции устройств на основе метода.

Детектирование веществ оптическими хемосенсорами представляет собой распознавание молекул по их способности образовывать влияющие на фотофизические свойства хемосенсоров межмолекулярные связи [10]. В сравнении с пространством физических параметров

веществ пространство их химических свойств шире благодаря множеству способов формирования межмолекулярных связей между хемосенсором и веществами. Это создает кросс-реактивность отклика хемосенсоров, полностью исключить которую на практике невозможно. Кросс-реактивность хемосенсоров вызывает ложноположительные и ложноотрицательные ошибки детектирования экотоксикантов (α - и β -ошибки) при воздействии на сенсор так называемых веществ-помех – соединений, смешанных с экотоксикантом и вызывающих отклик хемосенсора.

Для повышения надежности и информативности экспресс-контроля применяют комбинации кросс-реактивных хемосенсоров. Обнаруженное вещество может быть идентифицировано по сходству вектора вызываемого им отклика комбинации с заранее известными векторами откликов на вещества. Идентификация веществ в чистом виде с помощью комбинаций хемосенсоров наиболее широко представлена в [10–13].

При этом проблема подбора оптимальной комбинации хемосенсоров в литературе часто не рассматривается; вместо этого исследователи используют комбинацию из всех доступных хемосенсоров и выделяют информативную часть отклика методами сокращения размерности данных с минимальной потерей информативности [14]. Наиболее часто для этого применяется метод главных компонент (МГК), проектирующий выборку векторов на пространство, образуемое главными компонентами – векторами, вдоль которых дисперсия выборки максимальна [14]. Хотя МГК практичен как метод сокращения размерности, его результат зависит от величины отклика, и малоинтенсивные, но информативные сигналы хемосенсоров могут быть проигнорированы на фоне сигналов большей величины других хемосенсоров [15, 16].

Как метрика расстояния между многомерным вектором и многомерной случайно распределенной величиной используется дистанция Махаланобиса. Преобразование МГК не учитывает распределения векторов отклика хемосенсоров, которые могут пересекаться или быть близки в преобразованном пространстве, что снижает точность и надежность идентификации.

Это указывает на неоптимальность широко используемого подхода к выделению информативной части отклика комбинаций хемосенсорных материалов МГК и показывает, что даже при использовании МГК для надежной идентификации необходим подбор комбинаций материалов.

Цель работы – предложить метод подбора комбинаций хемосенсорных материалов, позволяющий составить из набора доступных материалов комбинацию, с помощью которой возможна наиболее надежная идентификация установленной группы парофазных веществ. Апробация предлагаемого метода рассмотрена на примере идентификации нитроароматических экотоксикантов и модельных веществ-помех при помощи комбинации твердофазных проницаемых флуоресцентных материалов на основе флуоресцентных хемосенсорных соединений.

Материалы и методы. Нитроароматические соединения нитробензол (НБ), динитротолуол (ДНТ), тринитротолуол (ТНТ), а также использованные в качестве веществ-помех соединения были аналитически чистыми. В качестве модельных веществ-помех были использованы вода, этанол, ацетон, толуол, 25 %-й (w/w) водный раствор гидроксида аммония, фенол, дихлорбензол, аллиламин, диэтиламин.

Флуоресцентные хемосенсорные материалы, использованные для подбора комбинаций, были получены и исследованы в [16–18]. Все материалы принадлежат типу проницаемых флуоресцентных материалов и получены нане-

сением растворов флуоресцентных составов в тетрагидрофуране дозатором или электроспиннингом на лист вспененной меламин-формальдегидной смолы, играющей роль проницаемой подложки. Список флуоресцентных материалов и методов их получения приведен в таблице; флуоресцентные соединения, использованные для получения материалов, были синтезированы по описанию в литературе.

Оценка динамики откликов материалов проводилась при помощи сенсорного элемента, газоанализатора и генератора насыщенных паров веществ [18]. Флуоресцентные материалы были нарезаны на фрагменты 4 × 4 мм и установлены в ячейки выполненного 3D-печатью картриджа сенсорного элемента (рис. 1). Газоанализатор (рис. 2 и 3) предназначен для регистрации интегральных интенсивностей флуоресценции каждого из хемосенсорных материалов на сенсорном элементе во время прокачки через них анализируемой газовой смеси. Сенсорный элемент устанавливали в газоанализатор как фильтр для прокачки анализируемой газовой смеси через хемосенсорные материалы. Центральная ячейка сенсорного элемента несквозная и предназначена для учета собственной флуоресценции МФ-подложки.

Для оценки сенсорных свойств флуоресцентных материалов пары аналита вводили в поток воздуха, поступающий в газоанализатор. Измерения проводили при 21.5 °С, окружающий воздух использовали в качестве чистого от паров аналитов; в ходе каждого измерения ис-

Использованные в работе флуоресцентные хемосенсорные материалы

Fluorescent chemosensory materials used in the study

Обозначение	Флуоресцентное соединение в основе состава	Состав наносимого раствора	Метод формирования	Источник
mF+PS	1,3,6,8-тетракис[(триметилсилил)этинил]пирен	Соединение, полистирол	Нанесение дозатором	[17]
mF/Elsp		Соединение		
mF+PS/Elsp		Соединение, полистирол		
M1	Поли[стирол-со-4-(1-пиренил)стирол]	Соединение	Напыление электроспиннингом	[18]
M2	Поли[стирол-со-4-(2-нафтил)стирол]	Соединение		
M3	Поли[стирол-со-4-(4'-(N,N-дифениламино)фенил)стирол]	Соединение		
mF1/Elsp	9-{4-[5-(пиримидин-4-ил)тиофен-2-ил]фенил}-9Н-карбазол	Соединение		[16]
mF2/Elsp	9-этил-3-(4-(5-(пиримидин-4-ил)тиофен-2-ил)фенил)-9Н-карбазол	Соединение		
mF3/Elsp	4-(5-(4-(4-(дифениламино)фенил)пиримидин-5-ил)тиофен-2-ил)-N,N-дифениланилин	Соединение		

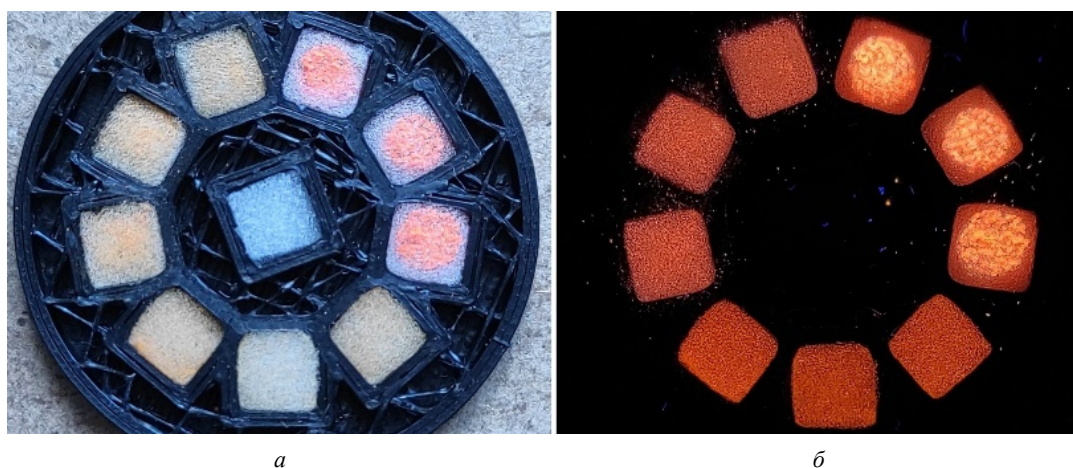


Рис. 1. Сенсорный элемент с флуоресцентными материалами: *a* – снятый при естественном освещении; *б* – под УФ-подсветкой [17]

Fig. 1. Sensor element with fluorescent materials: *a* – captured under natural light; *б* – under UV illumination [17]

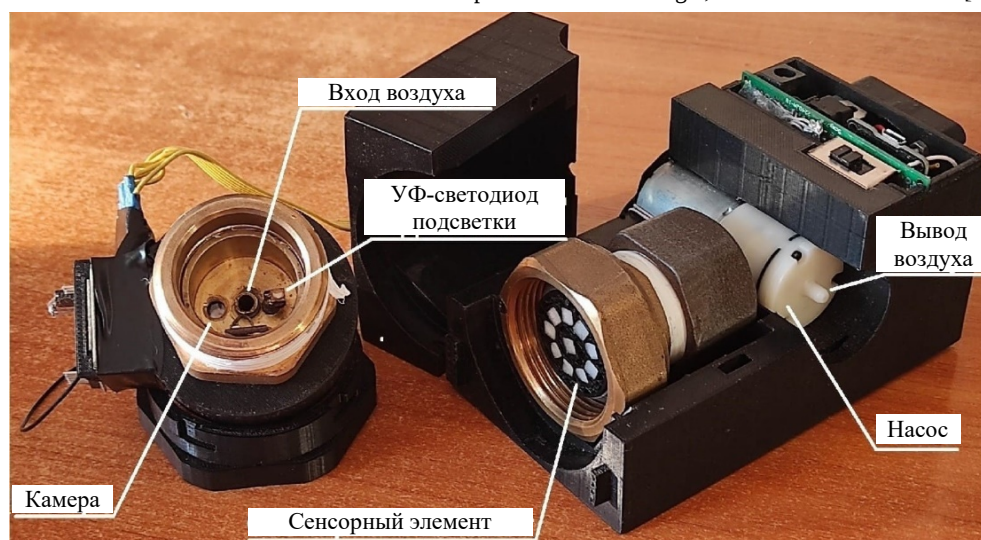


Рис. 2. Газоанализатор в детализированном виде [18]

Fig. 2. Detailed view of the gas analyzer [18]

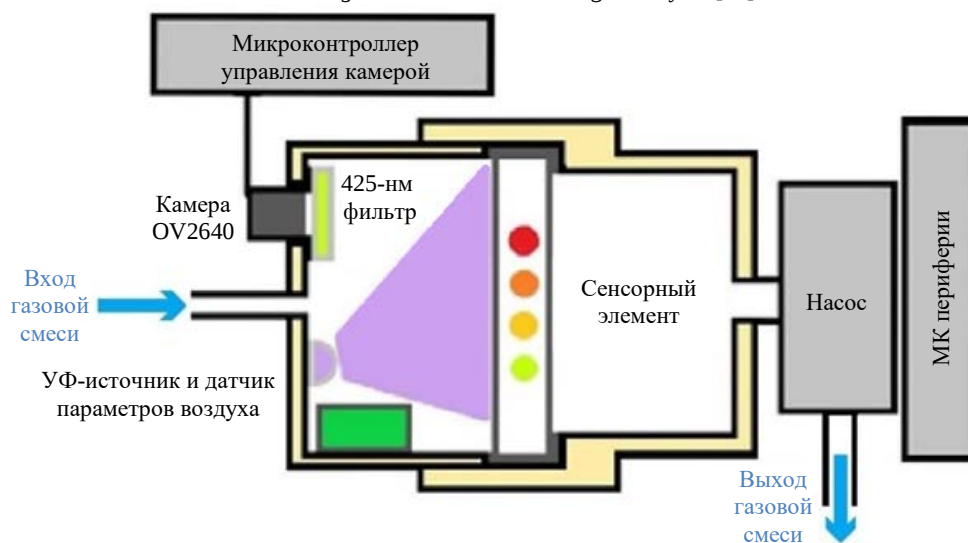


Рис. 3. Схематическое изображение газоанализатора [18]

Fig. 3. The schematic representation of the gas analyzer [18]

пользовали пар только от одного вещества. Пары в насыщенной или приближенной к насыщенной концентрациях получали по ранее описанному методу, включающему выдерживание аналита (1 г для твердых или 1 мл для жидких аналитов) в закрытой емкости в течение как минимум 24 ч [18]. Расчетные значения концентраций насыщенных паров веществ для температуры 21.5 °С и давления 730 мм рт. ст. составили: 287 ppm_v НБ, 273 ppb_v ДНТ, 5514 ppt_v ТНТ, 26354 ppm воды, 65887 ppm_v этанола, 271452 ppm_v ацетона, 32568 ppm_v толуола, 9155412 ppm_v аммиака, 1520 ppm_v дихлорбензола, 277637 ppm_v диэтиламина, 284009 ppm_v аллиламина, 338 ppm_v фенола [2, 3, 19–23].

Отклики флуоресцентных материалов на воздействие паров веществ. Отклик флуоресцентного материала $\Delta PL(t)$ на воздействие пара вещества был определен как

$$\Delta PL(t) = I_0(t) - I(t), \quad (1)$$

где t – момент времени от начала воздействия пара вещества на материал; $I_0(t)$ – предполагаемая для момента времени t исходная интенсивность флуоресценции в случае отсутствия воздействия (нулевой концентрации) пара вещества, о. е.; $I(t)$ – регистрируемая в момент времени t интенсивность флуоресценции материала под воздействием пара вещества, о. е.

Отклики флуоресцентных материалов на воздействие паровых веществ были зарегистрированы в ходе измерения согласно сценарию (рис. 4). Данный сценарий измерения

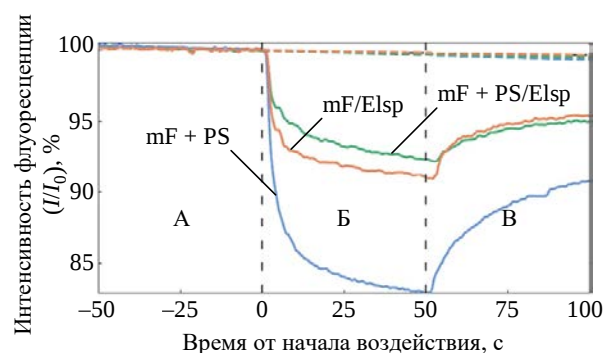


Рис. 4. Измерение по сценарию динамики флуоресценции материалов mF/Elsp, mF + PS, mF + PS/Elsp под воздействием насыщенного пара нитробензола [17]

Fig. 4. Scenario measurement of fluorescence dynamics of materials mF/Elsp, mF + PS, mF + PS/Elsp exposed to saturated nitrobenzene vapor [17]

включал интервал воздействия на материал пара вещества (интервал Б) 50 с, которому предшествует и за которым следует по интервалу такой же длительности воздействия на материал чистой от пара вещества газовой смесью. Дозэкспозиционный интервал показывает тренд изменения флуоресценции материала до воздействия пара вещества (интервал А). Послеэкспозиционный интервал показывает восстановление яркости флуоресценции при очистке материала под чистой от пара вещества газовой смесью (интервал В).

Величины $I_0(t)$ и $I(t)$ в (1) были определены для интервалов воздействия и восстановления (интервалы Б и В). За величину $I(t)$ взята регистрируемая интенсивность флуоресценции материала. Определение $I_0(t)$ было проведено расчетным образом по значениям интенсивности флуоресценции материала до воздействия пара вещества (интервал А). Для расчета значений $I_0(t)$ использована линейная аппроксимация значений интенсивности флуоресценции материала до момента начала воздействия пара аналита, экстраполяцией которой на интервалы воздействия и восстановления были получены оценки значений $I_0(t)$. Значения $I_0(t)$ и $I(t)$ были определены для каждого из фрагментов флуоресцентных материалов на сенсорном элементе. Расчет значений $I_0(t)$ призван исключить из отклика изменение интенсивности, обусловленное воздействием трудно исключаемых при измерении факторов: фотообесцвечивание материалов, параметры газовой смеси (содержание кислорода, влажность, температура).

Экспериментально полученные кривые значений $\Delta PL(t)$ флуоресцентных материалов, отражающие динамику отклика флуоресцентных материалов на воздействие насыщенного пара одного из веществ (по 3 кривых для каждой пары материал-вещество), были использованы для моделирования динамики отклика возможной комбинации материалов на то же воздействие.

Для отображения дисперсии $\Delta PL(t)$ материалов отклики каждого из материалов в комбинации были смоделированы как нормальные распределения, где средние значения равны усредненным экспериментально полученным ΔPL каждого из материалов и дисперсия равна

10 % от среднего значения. Ранее было показано, что относительная дисперсия ΔPL проницаемых материалов на основе мономолекулярных флуорофоров в матрицах полистирола составляет 7.8–13.3 % [24]. Динамика отклика была отражена набором многомерных подвыборок, включающих многомерные векторы отклика комбинации ΔPL к моментам времени $t \in \{10, 20, \dots, 100\}$ от начала воздействия пара вещества.

Идентификация откликов комбинаций на воздействие паров веществ. Информативны будут как полная идентификация обнаруженного пара с установлением вещества, так и частичная идентификация с установлением принадлежности вещества к некоторому классу соединений. При этом идентификация желательна еще до окончания измерения. Исходя из этого были сформулированы следующие задачи:

1. Задача I – предварительная идентификация принадлежности обнаруженного пара вещества к классу нитроароматических экотоксикантов (НБ, ДНТ, ТНТ) или веществ-помех (вода, этанол, ацетон, толуол, аммиак, фенол, дихлорбензол, аллиламин, диэтиламин).

2. Задача II – предварительная идентификация паров индивидуальных веществ, относящихся к нитроароматическим экотоксикантам или веществам-помехам.

Задача I рассмотрена напрямую как задача бинарной классификации. Задача II рассмотрена как набор бинарных задач типа "один против остальных". Предварительная идентификация была реализована как идентификация векторов отклика в моменты времени $t \in \{10, 20, \dots, 90, 100\}$, для чего была построена серия классификаторов, каждый из которых был обучен на подвыборке откликов комбинации в один из моментов времени t [25]. Идентификация аналита считалась состоявшейся при достижении классификатором точности классификации не менее 95 %. Точности классификаторов оценивались как точность классификации ими векторов, сгенерированных согласно многомерным нормальным распределениям, моделирующим отклики с дисперсией ΔPL ; сгенерированные для каждой оценки точности выборки включают по 1000 векторов отклика, пропорционально разделенных по классам.

Построение классификаторов, выполняющих идентификацию насыщенных паров ве-

ществ по многомерному вектору отклика комбинации, включало следующие преобразования:

1. Обучение модели сокращения размерности на основе МГК на многомерной выборке векторов отклика комбинации в $t = 50$ с.

2. Выбор момента времени t от начала измерения, в который выполняется идентификация.

3. Сокращение размерности многомерных векторов отклика комбинации на вещества в выбранный момент времени t до двухмерных моделью МГК.

4. Построение классификатора на полученной после сокращения размерности двухмерной выборке векторов отклика для решения одной из поставленных задач идентификации.

Для классификации векторов отклика были применены модели на основе метода опорных векторов (МОВ) с сетью радиальных базисных функций в качестве ядра. Классификатор на основе МОВ строит разделяющую границу в виде полосы максимальной ширины между классами векторов. Ширина разделяющей полосы – так называемый отступ – при равной регуляризации характеризует устойчивость классификатора на основе МОВ к искажениям в данных. При построении границы классификатором МОВ близким к ней опорным векторам придается больший вес, делая его устойчивым при обучении на выборках малого размера [14]. Параметры классификатора МОВ: параметр регуляризации $C = 1000$, радиальная базисная функция в качестве ядра; при обучении классификаторов была использована 5-кратная случайная кросс-валидация с оптимизацией классификатора по значению F_1 -меры.

Программный код для реализации идентификационных моделей, визуализации результатов и логики подбора комбинаций хемосенсорных материалов выполнен на Python с применением библиотек Pandas, Numpy, Scikit-learn, Scipy, Matplotlib.

Метрика качества комбинации. Для оценки надежности идентификации вектора отклика комбинацией материалов была предложена метрика качества $I(G, A)$, которая определена с использованием дистанции Махаланобиса:

$$d_M(\text{distr}(\mu, \Sigma), x) = \sqrt{(x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)},$$

где $d_M(\text{distr}(\mu, \Sigma), x)$ – дистанция Махаланобиса между точкой многомерного вектора x и центроидой многомерного распределения случайной величины; $\text{distr}(\mu, \Sigma)$ – многомерное распределение случайной величины с центроидой в точке μ и матрицей вариации-ковариации распределения Σ .

Для одномерных случайно распределенных величин широко применяется определение предела обнаружения как величины воздействия, при которой согласно градуировочной кривой сигнал равен 3 std. откл. (3σ) распределения значений сигнала в отсутствие воздействия; интервал 3σ соответствует доверительной вероятности 99.73 %. В двухмерном пространстве, получаемом после сокращения размерности выборки, доверительные интервалы (области) распределений векторов отклика и пределы обнаружения были изображены как эллипсы, точки которых удалены от центроида на дистанцию Махаланобиса, равную значению кумулятивного распределения χ^2 для $p = 0.0027$ и $df = 2$ [26]:

$$d_{M, \text{ПО}} = \sqrt{\chi^2(p = 0.0027, df = 2)} = \sqrt{11.829} = 3.439,$$

где $d_{M, \text{ПО}}$ – дистанция Махаланобиса от центроида до границы эллипса доверительной области.

Условием точной идентификации является разделение в пространстве преобразованных МГК векторов отклика; эллипсы доверительных интервалов распределений векторов откликов не должны пересекаться, а наличие разделяющей полосы между эллипсами повысит устойчивость идентификации. Также наиболее точная идентификация векторов отклика возможна в случае их ортогональности. Таким образом, необходима комбинация, для которой d_M между центроидами распределений векторов откликов велика, а сумма модулей скалярных произведений между векторами откликов мала. Идентификация веществ, вызывающих обратимое изменение сигнала хемосенсоров, будет затруднительна после окончания воздействия из-за близости их векторов отклика к вектору отклика на нулевое воздействие. Поэтому можно рассмотреть при подборе комбинации только отклики в $t = 50$ с

как наибольшие по абсолютной величине. Исходя из этого метрика качества комбинации $I(G, A)$ была определена как

$$I(G, A) = -d_{\parallel}(G, A) - n_A \frac{d_{M, \text{ПО}}}{d_{\uparrow}(G, A)}; \quad (2)$$

$$d_{\parallel}(G, A) = \sum_{a_j \in A} \sum_{a_i \in A} \left(\frac{a_i' a_j'}{\|a_i'\| \|a_j'\|} \right);$$

$$d_{\uparrow}(G, A) = \min \left\{ d_M(\text{distr}(a_i', \Sigma_i'), a_j') \right\},$$

где $I(G, A)$ – метрика качества комбинации хемосенсорных материалов G для решения задачи идентификации множества векторов отклика $A = \{a_i, \dots, a_{n_A}\}$; n_A – количество уникальных веществ, векторы отклика хемосенсорных материалов на которые включены во множество A ; $a_i = (a_{i,1}, \dots, a_{i,|G|})$ – центроид распределения многомерных векторов, моделирующих отклики комбинации G на i -е вещество в $t = 50$ с; a' – вектор a после сокращения его размерности до двухмерного моделью МГК; $\|a'\|$ – L_2 -норма вектора a' ; Σ_i' и a_i' – матрица вариации-ковариации и центроид распределения двухмерных векторов, полученных сокращением размерности моделью МГК распределения многомерных векторов отклика комбинации с центроидой в a_i ; $d_{\uparrow}(G, A)$ – наименьшая дистанция Махаланобиса между распределением векторов отклика на i -е вещество с центроидой a_i' и центроидами распределений векторов отклика на другие вещества по всем веществам из множества A .

Метод подбора комбинации. Подбор комбинации основан на максимизации метрики $I(G, A)$ в (2) путем включения в комбинацию одного из незадействованных хемосенсорных материалов, который наиболее увеличивает значение метрики. Подбор начат с выбора начальной комбинации из двух материалов с наибольшим значением метрики среди вариантов. Комбинация материалов, добавление материалов к которой не увеличивает ее $I(G, A)$, принималась как оптимальная.

Результаты. Предложенный метод был апробирован на примере подбора комбинации проникаемых флуоресцентных хемосенсорных материалов для идентификации паров нитроароматических экотоксикантов и веществ-помех. Среди сочетаний двух флуоресцентных материалов комбинация {mF/Elsp, mF2/Elsp} показала наибольшее качество и была взята в качестве начальной. Далее улучшение качества комбинации наблюдалось при включении в нее материала mF1/Elsp, после чего добавление любого другого материала в комбинацию не вело к увеличению метрики качества (рис. 5). Комбинация $G_1 = \{mF/Elsp, mF1/Elsp, mF2/Elsp\}$ была принята как наилучшая. Распределения векторов отклика на воздействие паров аналитов для комбинации материалов G_1 для ряда моментов времени t приведены



Рис. 5. Зависимость метрики качества комбинации $I(G, A)$ от размера комбинации

Fig. 5. Dependence of the metric of combination quality $I(G, A)$ on the combination size

на рис. 6, траектории центроидов распределений векторов отклика комбинации представлены на рис. 7. После сокращения размерности до двухмерной многомерная выборка векторов отклика сохраняет 98.4 % исходной дисперсии. Доверительные области распределений откликов на

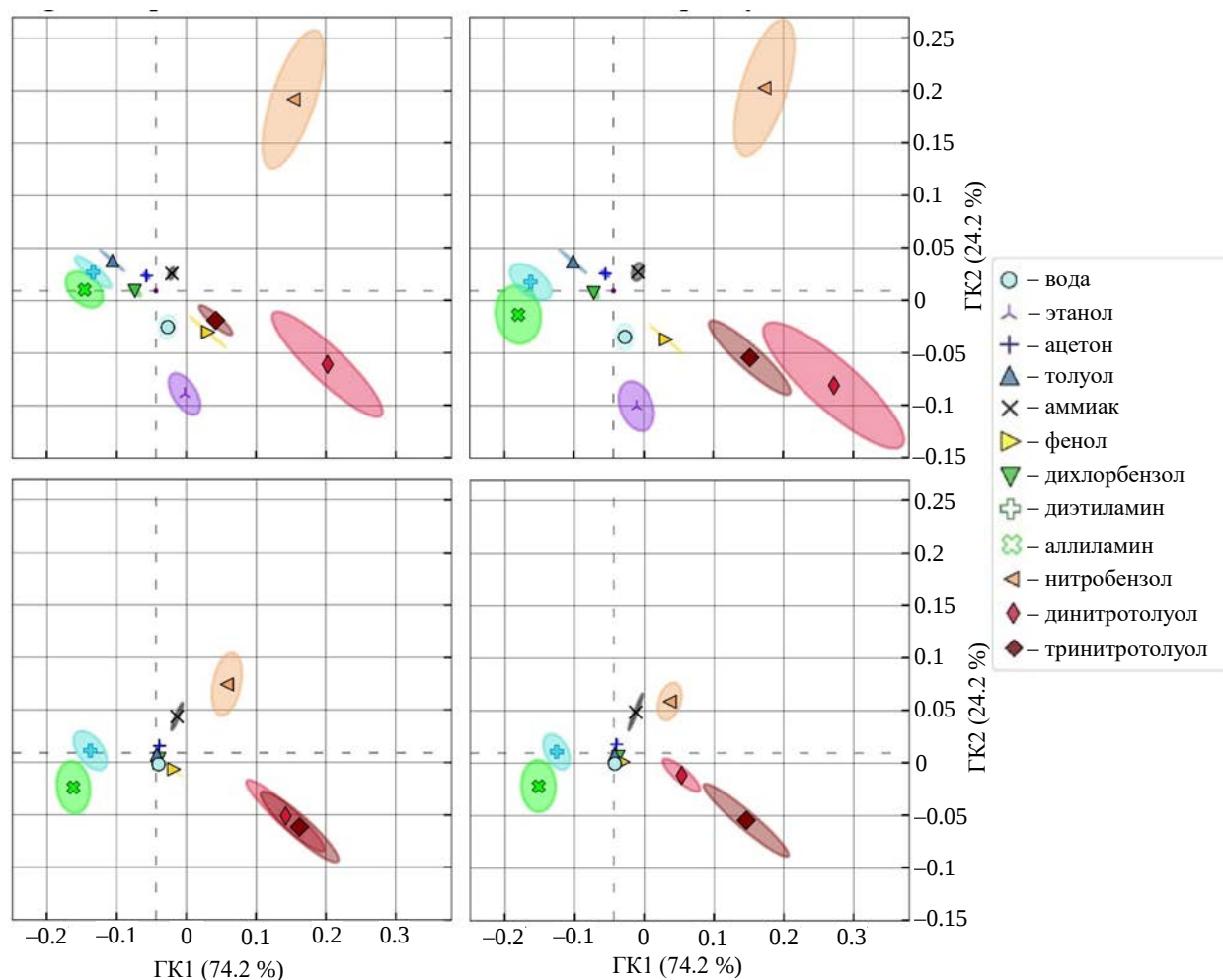


Рис. 6. Смоделированные распределения векторов отклика комбинации G_1 на воздействие насыщенных паров аналитов в пространстве сокращенной размерности в $t = 20$ с (сверху слева), $t = 50$ с (сверху справа), $t = 70$ с (снизу слева), $t = 100$ с (снизу справа) от начала воздействия (штриховыми линиями отмечена точка отклика на нулевое воздействие)

Fig. 6. Modeled distributions of response vectors of combination G_1 to saturated vapors of substances in the reduced dimensionality space at $t = 20$ s (top left), $t = 50$ s (top right), $t = 70$ s (bottom left), $t = 100$ s (bottom right) after the onset of vapor exposure (dashed lines indicate the vector of combination response to zero vapor exposure)

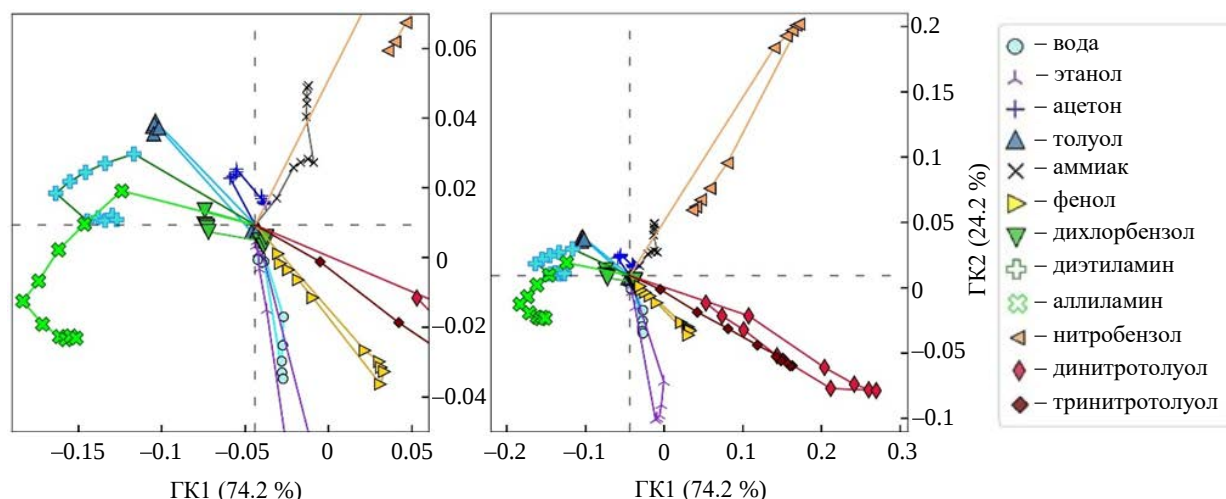


Рис. 7. Траектории во времени центроидов смоделированных распределений векторов отклика на насыщенные пары аналитов для комбинации G_1 в пространстве сокращенной размерности (наименьший масштаб слева)

Fig. 7. Trajectories in time of centroids of modeled distributions of response vectors of combination G_1 to saturated vapors of analytes in the reduced dimensionality space (the smallest scale on the left)

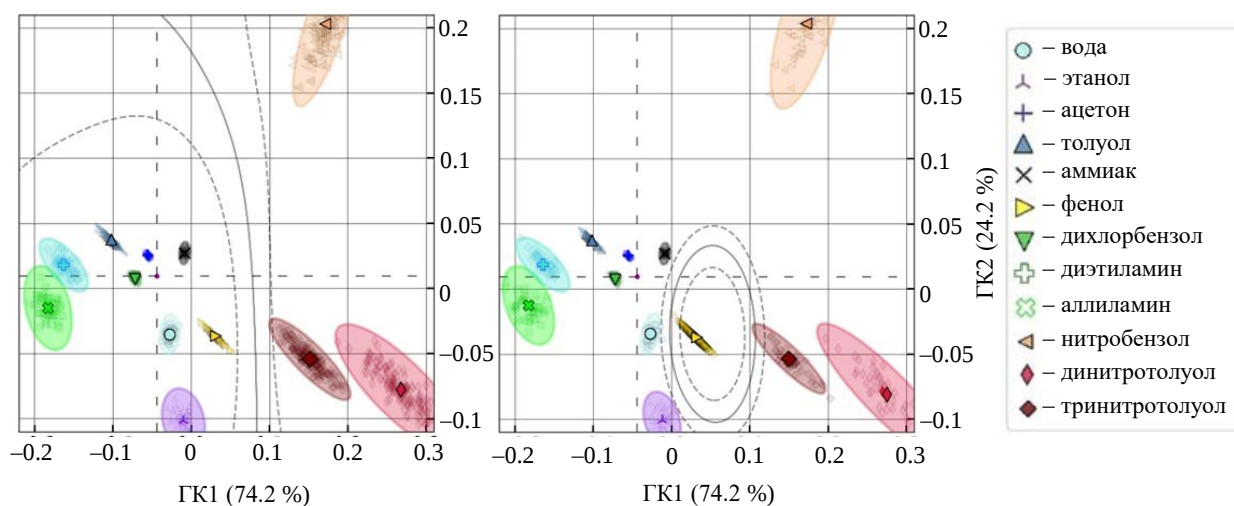


Рис. 8. Смоделированные распределения векторов отклика комбинации G_1 в $t = 50$ с и границы классификаторов МОВ (сплошные кривые) при идентификации нитроароматических экотоксикантов как класса (слева) и фенола как индивидуального вещества (справа); штриховыми кривыми отмечены уровни ± 0.5 решающей функции классификатора

Fig. 8. Modeled distributions of response vectors of combination G_1 at $t = 50$ s and decision boundaries of SVM classifiers identifying nitroaromatic ecotoxins as a class (left) and phenol as an individual substance (right); dashed curves indicate ± 0.5 levels of the decision function

воздействие веществ в $t = 50$ с частично пересекаются только для диэтиламина и аллиламина; в остальных случаях границы достоверных областей распределений векторов отклика разделены с отступом.

Смоделированная выборка откликов комбинации флуоресцентных материалов G_1 была использована для построения классификаторов МОВ. Примеры границ классификаторов МОВ, выполняющих идентификацию нитросодержащих экотоксикантов как класса (задача I) и идентификацию индивидуальных аналитов (задача II) пред-

ставлены на рис. 8. На рис. 9 представлены точности классификации насыщенных паров аналитов с помощью комбинации флуоресцентных материалов к моментам времени $t \in \{10, 20, \dots, 90, 100\}$.

Предварительная идентификация нитроароматических экотоксикантов как класса возможна спустя 10 с измерения (наименьший рассмотренный интервал), а отклики комбинации в моменты времени $t \in \{10, 20, 30\}$ позволяют идентифицировать все рассмотренные аналиты по отдельности. После окончания воздействия на материалы

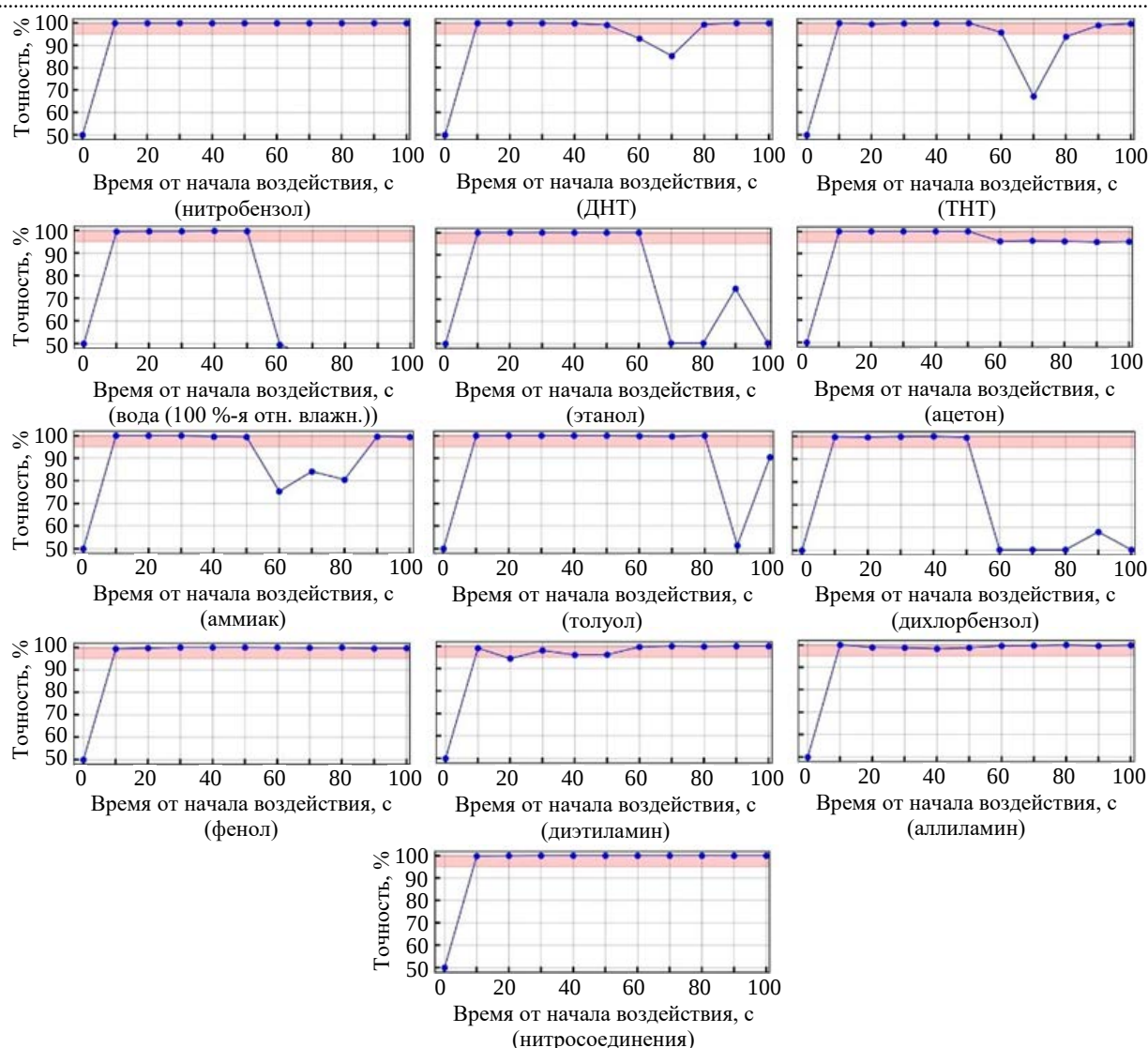


Рис. 9. Оценка точности идентификации насыщенных паров нитроароматических экотоксикантов как класса (снизу) и индивидуальных веществ (сверху) при помощи комбинации материалов G_1

Fig. 9. Evaluation of the classification accuracy of nitroaromatic ecotoxics as a class (bottom) and of individual substances (top) using a combination of materials G_1

в $t = 50$ с идентификация производящих обратимый отклик веществ затруднительна или невозможна из-за близости классифицируемых векторов к точке отклика на нулевое воздействие. Пары веществ, воздействие которых обладает ограниченной обратимостью, идентифицируются в том числе после окончания интервала воздействия на комбинацию.

Закключение. Предложен подход к решению проблемы подбора комбинаций хемосенсорных материалов для идентификации установленной группы веществ. Предложена метрика качества комбинации материалов, численно описывающая надежность классификации по степени ортогональности векторов отклика и близости распре-

делений векторов отклика комбинации на воздействие веществ. Показано, что метрика качества ниже для комбинации из всех доступных хемосенсорных материалов в сравнении с меньшей по размеру комбинацией, подобранной предложенным методом. Определена комбинация проникаемых флуоресцентных материалов, с помощью которой возможна наиболее надежная идентификация нитроароматических веществ и веществ-помех как классов, а также составляющих эти классы индивидуальных веществ. Подбором комбинации хемосенсоров предлагаемым методом можно повысить надежность идентификации веществ и сократить количество применяемых хемосенсорных материалов.

Список литературы

1. Harbison R. D., Bourgeois M. M., Johnson G. T. Hamilton and Hardy's Industrial Toxicology. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 1376 p. doi: 10.1002/9781118834015
2. The vapor pressures of explosives / R. G. Ewing, M. J. Waltman, D. A. Atkinson, J. W. Grate, P. J. Hotchkiss // Trends in Analytical Chemistry. 2013. Vol. 42. P. 35–48. doi: 10.1016/j.trac.2012.09.010
3. Östmark H., Wallin S., Ang H. G. Vapor pressure of explosives: a critical review // Propell. Explos. Pyrot. 2012. Vol. 37. P. 12–23. doi: 10.1002/prep.201100083
4. Chemical sniffing instrumentation for security applications / S. Giannoukos, B. Brkić, S. Taylor, A. Marshall, G. F. Verbeck // Chem. Rev. 2016. Vol. 116, iss. 14. P. 8146–8172. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00065
5. Daeid N. N., Yu H. A., Beardah M. S. Investigating TNT loss between sample collection and analysis // Science & Justice. 2016. Vol. 57, iss. 2. P. 95–100. doi: 10.1016/j.scijus.2016.10.007
6. Design of fluorescent sensors based on azaheterocyclic push-pull systems towards nitroaromatic explosives and related compounds: A review / E. V. Verbitskiy, G. L. Rusinov, O. N. Chupakhin, V. N. Charushin // Dyes Pigm. 2020. Vol. 180. P. 108414. doi: 10.1016/j.dyepig.2020.108414
7. Хемосенсоры для обнаружения нитроароматических (взрывчатых) веществ / Г. В. Зырянов, Д. С. Копчук, И. С. Ковалев, Э. В. Носова, В. Л. Русинов, О. Н. Чупахин // Успехи химии. 2014. Т. 83, № 9. С. 783–819. doi: 10.1070/RC2014v083n09ABEH00446
8. Fido X4. URL: <https://archive.fo/aC1Oy> (дата обращения: 04.04.2024)
9. Askim J. R., Suslick K. S. Hand-held reader for colorimetric sensor arrays // Anal. Chem. 2015. Vol. 87, iss. 15. P. 7810–7816. doi: 10.1021/acs.analchem.5b01499
10. Li Z., Suslick K. S. The optoelectronic nose // Acc. Chem. Res. 2021. Vol. 54. P. 950–960. doi: 10.1021/acs.accounts.0c00671
11. Non-contact identification and differentiation of illicit drugs using fluorescent films / K. Liu, C. Shang, Z. Wang, R. Miao, K. Liu, T. Liu, Y. Fang // Nature Communications. 2018. Vol. 9. Art. num. 1695. doi: 10.1038/s41467-018-04119-6
12. Li Z., Askim J. R., Suslick K. S. The optoelectronic nose: colorimetric and fluorometric sensor arrays // Chem. Rev. 2019. Vol. 119, iss. 1. P. 231–292. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00226
13. A digitally printed optoelectronic nose for the selective trace detection of nitroaromatic explosive vapours using fluorescence quenching / N. Bolse, R. Eckstein, M. Schend, A. Habermehl, C. Eschenbaum, G. Hernandez-Sosa, U. Lemmer // Flex. Print. Electron. 2017. Vol. 2. P. 024001. doi: 10.1088/2058-8585/aa6601
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The elements of statistical learning. 2nd ed. New York: Springer New York, 2009. 745 p. doi: 10.1007/978-0-387-84858-7
15. Jolliffe I. T., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments // Phil. Trans. R. Soc. A. 2016. Vol. 374. P. 20150202. doi: 10.1098/rsta.2015.0202
16. Комбинации люминесцентных материалов для однозначной идентификации паров нитросоединений / Р. Д. Чувашов, А. А. Баранова, К. О. Хохлов, Ю. А. Кваشین, Е. В. Вербицкий // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 4. С. 5–16. doi: 10.17223/7783494/4/1
17. Trimethylsilylethynyl-Substituted Pyrene Doped Materials as Improved Fluorescent Sensors towards Nitroaromatic Explosives and Related Compounds / R. D. Chuvashov, E. F. Zhilina, K. I. Lugovik, A. A. Baranova, K. O. Khokhlov et al. // Chemosensors. 2023. Vol. 11, iss. 3. P. 167. doi: 10.3390/chemosensors11030167
18. Random copolymers of styrene with pendant fluorophore moieties: synthesis and applications as fluorescence sensors for nitroaromatics / M. Zen Eddin, E. F. Zhilina, R. D. Chuvashov, A. I. Dubovik, A. V. Mekhave, K. A. Chistyakov, A. A. Baranova, K. O. Khokhlov, G. L. Rusinov, E. V. Verbitskiy, V. N. Charushin // Molecules. 2022. Vol. 27, № 20. P. 6957. doi: 10.3390/molecules27206957
19. Lynch E. J., Wilke C. R. Vapor Pressure of Nitrobenzene at Low Temperatures // J. Chem. Eng. Data. 1960. Vol. 5, iss. 3. P. 300. doi: 10.1021/je60007a018
20. Vapor Pressure of Chemicals. Subvolume B: Vapor Pressure and Antoine Constants for Oxygen Containing Organic Compounds / J. Dykx, J. Svoboda, R. C. Wilhoit, M. Frenkel, K. R. Hall. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 327 p.
21. Toluene. NIST Chemistry WebBook. URL: <https://archive.fo/luQNT> (дата обращения: 04.04.2024)
22. Ammonia. NIST Chemistry WebBook. URL: <https://archive.fo/QbeZz> (дата обращения: 04.04.2024)
23. Dichlorobenzene. NIST Chemistry WebBook. URL: <https://archive.fo/T29XZ> (дата обращения: 04.04.2024)
24. Флуоресцентное определение паров нитробензола с использованием допированного флуорофорами полистирола / Р. Д. Чувашов, Д. В. Беляев, К. О. Хохлов, А. А. Баранова, М. Зен Еддин, И. И. Мильман, Е. В. Вербицкий // Аналитика и контроль. 2022. Т. 26, № 4. С. 284–297. doi: 10.15826/analitika.2022.26.4.005
25. Gupta A., Biswas B., Dutta T. Approaches and Applications of Early Classification of Time Series: A Review // IEEE Transactions on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 1, iss. 1. P. 47–61. doi: 10.1109/TAI.2020.3027279
26. Brereton R. G. The Chi squared and multinormal distributions // J. Chemometrics. 2014. Vol. 29. P. 9–12. doi: 10.1002/cem.2680

Информация об авторе

Чувашов Роман Дмитриевич – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2018), инженер-исследователь кафедры экспериментальной физики Физико-технологического института

Уральского федерального университета. Автор 16 научных работ. Сфера научных интересов – флуоресцентные материалы; экспресс-контроль веществ и природной среды.

Адрес: Уральский федеральный университет, ул. Мира, д. 21, Екатеринбург, 620002, Россия

E-mail: chuva.rd.13@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7433-3110>

References

1. Harbison R. D., Bourgeois M. M., Johnson G. T. Hamilton and Hardy's Industrial Toxicology. 6th ed. Hoboken, Wiley, 2015, 1376 p. doi: 10.1002/9781118834015
2. Ewing R. G., Waltman M. J., Atkinson D. A., Grate J. W., Hotchkiss P. J. The Vapor Pressures of Explosives. Trends in Analytical Chemistry. 2013, vol. 42, pp. 35–48. doi: 10.1016/j.trac.2012.09.010
3. Östmark H., Wallin S., Ang H. G. Vapor Pressure of Explosives: A Critical Review. Propell. Explos. Pyrot. 2012, vol. 37, pp. 12–23. doi: 10.1002/prep.201100083
4. Giannoukos S., Brkić B., Taylor S., Marshall A., Verbeck G. F. Chemical Sniffing Instrumentation for Security Applications. Chem. Rev. 2016, vol. 116, iss. 14, pp. 8146–8172. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00065
5. Daeid N. N., Yu H. A., Beardah M. S. Investigating TNT Loss Between Sample Collection and Analysis. Science & Justice. 2016, vol. 57, iss. 2, pp. 95–100. doi: 10.1016/j.scijus.2016.10.007
6. Verbitskiy E. V., Rusinov G. L., Chupakhin O. N., Charushin V. N. Design of Fluorescent Sensors Based on Azaheterocyclic Push-Pull Systems Towards Nitroaromatic Explosives and Related Compounds: A Review. Dyes Pigm. 2020, vol. 180, p. 108414. doi: 10.1016/j.dyepig.2020.108414
7. Zyryanov G. V., Kopchuk D. S., Kovalev I. S., Rusinov V. L., Chupakhin O. N. Chemosensors for Detection of Nitroaromatic Compounds (Explosives). Russian Chemical Reviews. 2014, vol. 83, iss. 9, pp. 783–819. doi: 10.1070/RC2014v083n09ABEH00446 (In Russ.)
8. Fido X4. Available at: <https://archive.fo/aC1Oy> (accessed: 04.04.2024)
9. Askim J. R., Suslick K. S. Hand-Held Reader for Colorimetric Sensor Arrays. Anal. Chem. 2015, vol. 87, iss. 15, pp. 7810–7816. doi: 10.1021/acs.analchem.5b01499
10. Li Z., Suslick K. S. The Optoelectronic Nose. Acc. Chem. Res. 2021, vol. 54, pp. 950–960. doi: 10.1021/acs.accounts.0c00671
11. Liu K., Shang C., Wang Z., Miao R., Liu K., Liu T., Fang Y. Non-Contact Identification and Differentiation of Illicit Drugs Using Fluorescent Films. Nature Communications. 2018, vol. 9, art. num. 1695. doi: 10.1038/s41467-018-04119-6
12. Li Z., Askim J. R., Suslick K. S. The Optoelectronic Nose: Colorimetric and Fluorometric Sensor Arrays. Chem. Rev. 2019, vol. 119, iss. 1, pp. 231–292. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00226
13. Bolse N., Eckstein R., Schend M., Habermehl A., Eschenbaum C., Hernandez-Sosa G., Lemmer U. A Digitally Printed Optoelectronic Nose for the Selective Trace Detection of Nitroaromatic Explosive Vapours Using Fluorescence Quenching. Flex. Print. Electron. 2017, vol. 2, p. 024001. doi: 10.1088/2058-8585/aa6601
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. 2nd ed. New York, Springer New York, 2009, 745 p. doi: 10.1007/978-0-387-84858-7
15. Jolliffe I. T., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments. Phil. Trans. R. Soc. A. 2016, vol. 374, p. 20150202. doi: 10.1098/rsta.2015.0202
16. Chuvashov R. D., Baranova A. A., Khokhlov K. O., Kvashnin Y. A., Verbitskiy E. V. Combinations of Luminescent Materials for Unambiguous Identification of Nitrocompound Vapors. Life Safety. Security Technologies. 2023, vol. 4, pp. 5–16. doi: 10.17223/7783494/4/1 (In Russ.)
17. Chuvashov R. D., Zhilina E. F., Lugovik K. I., Baranova A. A., Khokhlov K. O., et al. Trimethylsilyl-ethynyl-Substituted Pyrene Doped Materials as Improved Fluorescent Sensors towards Nitroaromatic Explosives and Related Compounds. Chemosensors. 2023, vol. 11, iss. 3, p. 167. doi: 10.3390/chemosensors11030167
18. Zen Eddin M., Zhilina E. F., Chuvashov R. D., Dubovik A. I., Mekhave A. V., Chistyakov K. A., Baranova A. A., Khokhlov K. O., Rusinov G. L., Verbitskiy E. V., Charushin V. N. Random Copolymers of Styrene with Pendant Fluorophore Moieties: Synthesis and Applications as Fluorescence Sensors for Nitroaromatics. Molecules. 2022, vol. 27, no. 20, p. 6957. doi: 10.3390/molecules27206957
19. Lynch E. J., Wilke C. R. Vapor Pressure of Nitrobenzene at Low Temperatures. J. Chem. Eng. Data. 1960, vol. 5, iss. 3, p. 300. doi: 10.1021/je60007a018
20. Dykyj J., Svoboda J., Wilhoit R. C., Frenkel M., Hall K. R. Vapor Pressure of Chemicals. Subvolume B: Vapor Pressure and Antoine Constants for Oxygen Containing Organic Compounds. Berlin, Springer-Verlag, 2000, 327 p.
21. Toluene. NIST Chemistry WebBook. Available at: <https://archive.fo/luQNt> (accessed: 04.04.2024)
22. Ammonia. NIST Chemistry WebBook. Available at: <https://archive.fo/QbeZz> (accessed: 04.04.2024)
23. Dichlorobenzene. NIST Chemistry WebBook. Available at: <https://archive.fo/T29XZ> (accessed: 04.04.2024)
24. Chuvashov R. D., Belyaev D. V., Khokhlov K. O., Baranova A. A., Eddin M. Z., Milman I. I., Verbitskiy E. V. Fluorescent detection of nitrobenzene vapors via fluorophore-doped polystyrene materials. Analytics and Control. 2022, vol. 26, no. 4, pp. 284–297. doi: 10.15826/analitika.2022.26.4.005 (In Russ.)
25. Gupta A., Biswas B., Dutta T. Approaches and Applications of Early Classification of Time Series: A

Review. IEEE Transactions on Artificial Intelligence. 2020, vol. 1, iss. 1, pp. 47–61. doi: 10.1109/TAI.2020.3027279

26. Brereton R. G. The Chi Squared and Multinormal Distributions. J. Chemometrics. 2014, vol. 29, pp. 9–12. doi: 10.1002/cem.2680

Information about the author

Roman D. Chuvashov, Master in Biotechnical systems and technologies (2018), Research Engineer of Ural Federal University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: fluorescent materials; express-control of substances and environment.

Address: Ural Federal University, 21, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia

E-mail: chuva.rd.13@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7433-3110>

Правила для авторов статей

В редакцию журнала "Известия вузов России. Радиоэлектроника" необходимо представить:

- распечатку рукописи (1 экз.) – твердую копию файла статьи, подписанную всеми авторами (объем оригинальной статьи не менее 8 страниц, обзорной статьи не более 20 страниц);
- электронную копию статьи;
- 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;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- сведения об авторах и их электронную копию (на русском и английском языках) (1 экз.);
- рекомендацию кафедры (подразделения) к опубликованию (следует указать предполагаемую рубрику) (1 экз.);
- сопроводительное письмо (1 экз.).

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 рекомендуется придерживаться следующей структуры статьи:

- Заголовочная часть:

- УДК (выравнивание по левому краю);
- название статьи;
- авторы (перечень авторов – Ф. И. О. автора (-ов) полностью. Инициалы ставятся перед фамилиями, после каждого инициала точка и пробел; инициалы не отрываются от фамилии. Если авторов несколько – Ф. И. О. разделяются запятыми), если авторов больше 3, необходимо в конце статьи указать вклад каждого в написание статьи;
- место работы каждого автора и почтовый адрес организации. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, а затем список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
- аннотация – 200–250 слов, характеризующих содержание статьи;
- ключевые слова – 5–7 слов и/или словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми; в конце списка точка не ставится;
- источник финансирования – указываются источники финансирования (гранты, совместные проекты и т. п.). Не следует использовать сокращенные названия институтов и спонсирующих организаций;
- благодарности. В данном разделе выражается признательность коллегам, которые оказывали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес статьи. Прежде чем выразить благодарность, необходимо заручиться согласием тех, кого планируете поблагодарить;
- конфликт интересов – авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. Например, «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». Если конфликт интересов возможен, то необходимо пояснение (см. <https://publicationethics.org>).

- Заголовочная часть на английском языке:
 - название (Title);
 - авторы (Authors);
 - место работы каждого автора (Affiliation). Необходимо убедиться в корректном (согласно уставу организации) написании ее названия на английском языке. Перевод названия возможен лишь при отсутствии англоязычного названия в уставе. Если авторы относятся к разным организациям, то после указания всех авторов, относящихся к одной организации, дается ее наименование, затем приводится список авторов, относящихся ко второй организации, наименование второй организации, и т. д.;
 - аннотация (Abstract);
 - ключевые слова (Keywords);
 - источник финансирования (Acknowledgements);
 - конфликт интересов (Conflict of interest).
- Текст статьи.
- Приложения (при наличии).
- Авторский вклад. Если авторов больше 3, необходимо указать вклад каждого в написание статьи.
- Список литературы (библиографический список);
- Информация об авторах.

Название статьи должно быть информативным, с использованием основных терминов, характеризующих тему статьи, и четко отражать ее содержание в нескольких словах. Хорошо сформулированное название – гарантия того, что работа привлечет читательский интерес. Следует помнить, что название работы прочтут гораздо больше людей, чем ее основную часть.

Авторство и место в перечне авторов определяется договоренностью последних. При примерно равном авторском вкладе рекомендуется алфавитный порядок.

Аннотация представляет собой краткое описание содержания изложенного текста. Она должна отражать актуальность, постановку задачи, пути ее решения, фактически полученные результаты и выводы. Содержание аннотации рекомендуется представить в структурированной форме:

Введение. Приводится общее описание исследуемой области, явления. Аннотацию не следует начинать словами «Статья посвящена...», «Цель настоящей статьи...», так как вначале надо показать необходимость данного исследования в силу пробела в научном знании, почему и зачем проведено исследование (описать кратко).

Цель работы. Постановка цели исследования (цель может быть заменена гипотезой или исследовательскими вопросами).

Материалы и методы. Обозначение используемой методологии, методов, процедуры, где, как, когда проведено исследование и пр.

Результаты. Основные результаты (приводятся кратко с упором на самые значимые и привлекательные для читателя/научного сообщества).

Обсуждение (Заключение). Сопоставление с другими исследованиями, описание вклада исследования в науку.

В аннотации не следует упоминать источники, использованные в работе, пересказывать содержание отдельных разделов.

При написании аннотации необходимо соблюдать особый стиль изложения: избегать длинных и сложных предложений, выражать мысли максимально кратко и четко. Составлять предложения только в настоящем времени и только от третьего лица.

Рекомендуемый объем аннотации – 200–250 слов.

Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования. Рекомендуемое количество ключевых слов/фраз – 5–7, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3.

Текст статьи излагается в определенной последовательности. Рекомендуется придерживаться формата IMRAD (Introduction, Methods, Results, Discussion; Введение, Методы, Результаты, Обсуждение):

Введение. Во введении автор знакомит с предметом, задачами и состоянием исследований по теме публикации; при этом необходимо обязательно ссылаться на источники, из которых берется информация. Автор приводит описание "белых пятен" в проблеме или того, что еще не сделано, и формулирует цели и задачи исследования.

В тексте могут быть применены сноски, которые нумеруются арабскими цифрами. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники из Интернета, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования).

Методы. Необходимо описать теоретические или экспериментальные методы исследования, используемое оборудование и т. д., чтобы можно было оценить и/или воспроизвести исследование. Метод или методологию проведения исследования целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной.

Научная статья должна отображать не только выбранный инструментарий и полученные результаты, но и логику самого исследования или последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические выводы. По результатам экспериментальных исследований целесообразно описать стадии и этапы экспериментов.

Результаты. В этом разделе представлены экспериментальные или теоретические данные, полученные в ходе исследования. Результаты даются в обработанном варианте: в виде таблиц, графиков, диаграмм, уравнений, фотографий, рисунков. В этом разделе приводятся только факты. В описании полученных результатов не должно быть никаких пояснений – они даются в разделе «Обсуждение».

Обсуждение (Заключение и Выводы). В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования, приводят сравнение полученных собственных результатов с результатами других авторов. Необходимо показать, что статья решает научную проблему или служит приращению нового знания. Можно объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений. Здесь излагаются предложения по направлению будущих исследований.

Список литературы (библиографический список) содержит сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи литературном источнике. В список литературы включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии).

Список литературы должен иметь не менее 15 источников (из них, при наличии, не более 20 % – на собственные работы), имеющих статус научных публикаций.

Приветствуются ссылки на современные англоязычные издания (требования МНБД Scopus – 80 % цитируемых англоязычных источников).

Ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются. Не допускаются ссылки на учебники, учебные пособия, справочники, словари, диссертации и другие малотиражные издания.

Если описываемая публикация имеет цифровой идентификатор Digital Object Identifier (DOI), его необходимо указывать в самом конце библиографической ссылки в формате "doi: ...". Проверять наличие DOI статьи следует на сайте: <http://search.crossref.org> или <https://www.citethisforme.com>.

Нежелательны ссылки на источники более 10–15-летней давности, приветствуются ссылки на современные источники, имеющие идентификатор doi.

За достоверность и правильность оформления представляемых библиографических данных авторы несут ответственность вплоть до отказа в праве на публикацию.

Аннотация на английском языке (Abstract) в русскоязычном издании и международных базах данных является для иностранных читателей основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований. Зарубежные специалисты по аннотации

оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе российского ученого, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором.

Текст аннотации должен быть связным и информативным. При написании аннотации рекомендуется использовать Present Simple Tense. Present Perfect Tense является допустимым. Рекомендуемый объем – 200–250 слов.

Список литературы (References) для зарубежных баз данных приводится полностью отдельным блоком, повторяя список литературы к русскоязычной части. Если в списке литературы есть ссылки на иностранные публикации, то они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. В References совершенно недопустимо использовать российский ГОСТ 7.0.5–2008. Библиографический список представляется с переводом русскоязычных источников на латиницу. При этом применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Типовые примеры описания в References приведены на сайте журнала <https://re.eltech.ru>.

Сведения об авторах

Включают для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание (с датами присвоения и присуждения), почетные звания (с датами присвоения и присуждения), краткую научную биографию, количество печатных работ и сферу научных интересов (не более 5–6 строк), название организации, должность, служебный и домашний адреса, служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты. Если ученых и/или академических степеней и званий нет, то следует указать место получения высшего образования, год окончания вуза и специальность. Также требуется включать идентификационный номер исследователя ORCID (Open Researcher and Contributor ID), который отображается как адрес вида <http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>. При этом важно, чтобы кабинет автора в ORCID был заполнен информацией об авторе, имел необходимые сведения о его образовании, карьере, другие статьи. Вариант «нет общедоступной информации» при обращении к ORCID не допускается. В сведениях следует указать автора, ответственного за прохождение статьи в редакции.

Правила оформления текста

Текст статьи подготавливается в текстовом редакторе Microsoft Word. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля – верхнее и нижнее 2.5 см, левое и правое 2.25 см; колонтитулы – верхний 1.5 см, нижний 2.5 см. Применение полужирного и курсивного шрифтов допустимо при крайней необходимости.

Дополнительный, поясняющий текст следует выносить в подстрочные ссылки при помощи знака сноски, а при большом объеме – оформлять в виде приложения к статье. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) – в квадратных прямых.

Все сведения и текст статьи набираются гарнитурой "Times New Roman"; размер шрифта основного текста 11 pt, остальных сведений 10 pt; выравнивание по ширине; абзацный отступ 0.6 см; межстрочный интервал "Множитель 1.1"; автоматическая расстановка переносов.

Правила верстки списка литературы, формул, рисунков и таблиц подробно описаны на сайте <https://re.eltech.ru>.

Перечень основных тематических направлений журнала

Тематика журнала соответствует номенклатуре научных специальностей:

2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь:

- 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника.
- 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.
- 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.
- 2.2.4 – Приборы и методы измерения (по видам измерений).
- 2.2.5 – Приборы навигации.
- 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

2.2.7 – Фотоника.

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

2.2.9 – Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры.

2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы.

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация.

Указанные специальности представляются в журнале следующими основными рубриками:

"Радиотехника и связь":

- Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов.
- Проектирование и технология радиоэлектронных средств.
- Телевидение и обработка изображений.
- Электродинамика, микроволновая техника, антенны.
- Системы, сети и устройства телекоммуникаций.
- Радиолокация и радионавигация.

"Электроника":

- Микро- и нанoeлектроника.
- Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника.
- Радиофотоника.
- Электроника СВЧ.

"Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы":

- Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн.
- Метрология и информационно-измерительные приборы и системы.
- Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий.

Адрес редакционной коллегии: 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 литера 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 27 № 4 2024

Vol. 27 No. 4 2024

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 27.09.24. Формат 60×84 1/8.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 15.86. Печ. л. 15.25. Тираж 300 экз. (1-й завод 1–150 экз.) Заказ 118.

Цена свободная.

Signed to print 27.09.24. Sheet size 60×84 1/8.

Educational-ed. liter. 15.86. Printed sheets 15.25. Number of copies 300.

Printing plant 1–150 copies. Order no. 118.

Free price.

Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5 Ф

ETU Publishing house
5 F Prof. Popov St., St Petersburg 197022, Russia