

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
- Управление качеством продукции. Стандартизация
- Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
- Modern radio engineering and telecommunication systems
- Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
- Analytical instrument engineering and technology
- Mathematical modeling
- Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
- Product quality management. Standardization
- Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2022, том 10, № 3

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 3

<https://www.rtj-mirea.ru>



Russian Technological Journal
2022, том 10, № 3

Дата опубликования 31 мая 2022 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радио-технических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: один раз в два месяца.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Журнал индексируется в РГБ, РИНЦ, elibrary,
Сочионет, Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD),
Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's
International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО
МИРЭА – Российский технологический университет
(РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения
о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г.
СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» **79641**.

<https://www.rtlj-mirea.ru>

Russian Technological Journal
2022, Vol. 10, No. 3

Publication date May 31, 2022.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Periodicity: bimonthly.

The journal was founded in December 2013. The titles were
«Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and
«Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until
July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

The Journal is included in RSL (Russian State Library),
Russian citation index, elibrary, Socionet, Directory of Open
Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly
Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative,
Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy
of Sciences, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor,
President of MIREA – Russian Technological University
(RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733
was issued in August 19, 2021
by the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media of Russia.

The subscription index of *Pressa Rossii*: **79641**.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	д.т.н., профессор, ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	хабилированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@ff.vu.lt
Бетелин Владимир Борисович	академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Вахрушев Сергей Борисович	д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	д.т.н., профессор, РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Крамаров Сергей Олегович	д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Новиков Дмитрий Александрович	член-корр. РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Перно Филипп	профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соболевский Андрей Николаевич	д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Сюй Ли Да	PhD (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Харин Юрий Семенович	член-корр. Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Чаплыгин Юрий Александрович	академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Шпак Василий Викторович	к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Juras Banys	Habilitation Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Vladimir B. Betelin	Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Alexei A. Bokov	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada. Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Alexey V. Kimel	PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Dmitry A. Novikov	Dr. Sci. (Eng.), Corr. Member of the RAS, Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Philippe Pernod	Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Andrei N. Sobolevski	Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Li Da Xu	Ph.D. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Yury S. Kharin	Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Yuri A. Chaplygin	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Vasilii V. Shpak	Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *Е.Г. Андрианова, Л.А. Демидова, П.Н. Советов*
«Цифровой ассистент преподавателя» в массовом профессиональном обучении для цифровой экономики
- 24** *И.Е. Тарасов, Д.С. Потехин, О.В. Платонова*
Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 34** *А.С. Сигов, Н.Б. Голованова, О.А. Минаева, С.И. Аневский, Р.В. Шамин, О.И. Останина*
Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- 45** *Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, И.А. Глинский, Р.А. Хабибуллин*
Высокотемпературные квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: оптимизация дизайнов и экспериментальные результаты
- 56** *Н.Ю. Пименов, С.Д. Лавров, А.В. Кудрявцев, А.Ю. Авдигиян*
Моделирование зонной структуры двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$
- 64** *Ф.А. Федюлов, Д.В. Савельев, Д.В. Чашин, В.И. Шишкин, Ю.К. Фетисов*
Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца
- 74** *Ф.А. Зайнуллин, Д.И. Хусяинов, М.В. Козинцева, А.М. Буряков*
Анализ поляризации ТГц-излучения с помощью решетчатого поляризатора и кристалла ZnTe
- 85** *Д.В. Савельев, Л.Ю. Фетисов, В.И. Мусатов, М.В. Джапаридзе*
Анизотропный магнитоэлектрический эффект в структуре цирконат–титанат свинца / магнитострикционный волоконный композит

Аналитическое приборостроение и технологии

- 93** *В.А. Головин, С.А. Тюрина, В.А. Щелков*
Современные подходы к снижению накипеобразования в теплообменном оборудовании
- 103** *О.Ю. Коваленко, С.А. Микаева, Ю.А. Журавлёва*
Исследование и разработка импульсных электронных пускорегулирующих аппаратов в комплекте с ультрафиолетовыми лампами

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 111** *И.Ю. Мамедова, А.Э. Дрюкова, Н.Е. Мильчакова*
Концепция юзабилити с позиции универсального дизайна

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Elena G. Andrianova, Liliya A. Demidova, Petr N. Sovetov*
Pedagogical design of a digital teaching assistant in massive professional training for the digital economy
- 24** *Ilya E. Tarasov, Dmitry S. Potekhin, Olga V. Platonova*
Prospects for using soft processors in systems-on-a-chip based on field-programmable gate arrays

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 34** *Alexander S. Sigov, Nataliya B. Golovanova, Olga A. Minaeva, Sergei I. Anevsky, Roman V. Shamin, Olga I. Ostanina*
Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 45** *Dmitrii V. Ushakov, Alexander A. Afonenko, Igor A. Glinskiy, Rustam A. Khabibullin*
High-temperature terahertz quantum-cascade lasers: design optimization and experimental results
- 56** *Nikita Yu. Pimenov, Sergey D. Lavrov, Andrey V. Kudryavtsev, Artur Yu. Avdizhiyan*
Modeling of two-dimensional $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ alloy band structure
- 64** *Fedor A. Fedulov, Dmitriy V. Saveliev, Dmitriy V. Chashin, Vladimir I. Shishkin, Yuri K. Fetisov*
Magnetoelectric effects in stripe- and periodic heterostructures based on nickel–lead zirconate titanate bilayers
- 74** *Farkhad A. Zainullin, Dinar I. Khusyainov, Marina V. Kozintseva, Arseniy M. Buryakov*
Polarization analysis of THz radiation using a wire grid polarizer and ZnTe crystal
- 85** *Dmitriy V. Saveliev, Leonid Y. Fetisov, Vladimir I. Musatov, Mikhail V. Dzhaparidze*
Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures

Analytical instrument engineering and technology

- 93** *Vladimir A. Golovin, Svetlana A. Tyurina, Vyacheslav A. Shchelkov*
Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment
- 103** *Olga Yu. Kovalenko, Svetlana A. Mikaeva, Yulia A. Zhuravleva*
Research and development of pulse electronic control devices with UV lamps

Philosophical foundations of technology and society

- 111** *Irina Yu. Mamedova, Anna E. Dryukova, Natalia E. Milchakova*
The concept of usability in terms of universal design

УДК 004.02+004.4+004.891+004.91
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-7-23>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

«Цифровой ассистент преподавателя» в массовом профессиональном обучении для цифровой экономики

Е.Г. Андрианова[®],
Л.А. Демидова,
П.Н. Советов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: andrianova@mirea.ru

Резюме

Цели. Активная цифровизация российской экономики вызывает дефицит ИТ-кадров и, в первую очередь, дефицит разработчиков программного обеспечения. Для российского университетского образования актуальной является задача массовой профессиональной подготовки таких специалистов. Цель работы – повышение качества массовой профессиональной подготовки программистов путем создания, внедрения и развития функциональности компьютерной системы «Цифровой ассистент преподавателя» (ЦАП). Эта система позволяет преподавателю в условиях массового обучения сконцентрироваться на функциях, требующих творческого подхода – составлении и обсуждении нетривиальных задач по программированию.

Методы. Использованы педагогические методы персонификации учебного процесса. Общий подход основан на удовлетворении ограничений для создания генераторов задач по программированию. При генерации задач применены методы порождения случайных программ и данных на основе вероятностных контекстно-зависимых грамматик, а также методы трансляции с использованием дерева абстрактного синтаксиса. Для декларативного представления генератора задач применены методы функционального программирования, позволяющие создать предметно-ориентированный язык с помощью комбинаторов. Для проверки решений использованы методы автоматического тестирования.

Результаты. Разработана структура системы ЦАП. Рассмотрена автоматическая генерация задач по программированию, выделены классы практических задач, отражающие современную специфику разработки программного обеспечения, приведены примеры их генерации. Приведена схема генератора задач по программированию. Описана процедура автоматической проверки решения задач, осуществляемая с помощью набора программных тестов, сформированного генератором задач. Приведена процедура комплексной оценки решения обучающегося, включающая проверку корректности результата и проверку на плагиат решений в случае задач, созданных преподавателем вручную; соответствие стандарту стиля написания программы, метрикам оценки сложности программы и т.д. Рассмотрены ведение статистики успеваемости обучающихся и интерфейс взаимодействия обучающихся и преподавателей.

Выводы. Опыт внедрения ЦАП в учебный процесс курса «Программирование на языке Python» подтвердил возможность обеспечения персонификации учебного процесса для обучающихся в виде индивидуальных образовательных траекторий.

Ключевые слова: массовое обучение программированию, цифровой ассистент преподавателя, генерация заданий, индивидуальная траектория обучения, мотивация обучающихся

• Поступила: 29.12.2021 • Доработана: 03.03.2022 • Принята к опубликованию: 11.05.2022

Для цитирования: Андрианова Е.Г., Демидова Л.А., Советов П.Н. «Цифровой ассистент преподавателя» в массовом профессиональном обучении для цифровой экономики. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):7–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-7-23>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Pedagogical design of a digital teaching assistant in massive professional training for the digital economy

Elena G. Andrianova[@],
Liliya A. Demidova,
Petr N. Sovetov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: andrianova@mirea.ru

Abstract

Objectives. The active digitalization of the Russian economy has resulted in a shortage of IT personnel; this is particularly true of software developers. Thus, the Russian university education is faced with the task of undertaking the large-scale professional training of such specialists. The purpose of the present work was to support the large-scale ("massive") professional training of programmers through the creation and implementation of Digital Teaching Assistant (DTA) computer system, allowing teachers working under stressful conditions to concentrate on functions that require a creative approach, namely, drawing up and discussing nontrivial programming tasks.

Methods. Pedagogical methods for the personification of learning processes were employed. The general approach was based on satisfying the constraints for creating programming task generators. Tasks were generated using methods for generating random programs and data based on probabilistic context-sensitive grammars, along with translation methods using an abstract syntax tree. The declarative representation of the task generator was performed using functional programming methods, allowing the creation of a domain-specific language using combinators. The solutions were checked using automated testing methods.

Results. The developed structure of the proposed DTA system was presented. Considering the automatic generation of programming tasks, classes of practical tasks that reflected the modern specifics of software development were identified along with examples of their generation. A diagram of the programming task generator was provided along with a description of the procedure for automatically checking the solutions of the tasks using a set of program tests generated by the task generator. The presented procedure for comprehensive assessment of a student's solution included verification of the correctness of the result and plagiarism checks in the case of tasks created manually by the teacher; this also involved validation for compliance with coding style standards, along with metrics for assessing program complexity, etc. The means for recording of statistics of academic achievement of students was characterized along with the interface of interaction between students and teachers.

Conclusions. The experience of introducing a DTA into the learning process of teaching programming in Python confirmed the possibility of personifying the learning process in the form of individual learning paths.

Keywords: massive programming learning, Digital Teaching Assistant, task generation, individual learning path, student motivation

• Submitted: 29.12.2021 • Revised: 03.03.2022 • Accepted: 11.05.2022

For citation: Andrianova E.G., Demidova L.A., Sovetov P.N. Pedagogical design of a digital teaching assistant in massive professional training for the digital economy. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):7–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-7-23>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация экономики коренным образом преобразует все сферы человеческой деятельности, порождая острую необходимость наличия большого количества профессионалов, обладающих ИТ-компетенциями или цифровыми компетенциями. В настоящее время актуальной является задача массовой подготовки профессиональных кадров для цифровой экономики, в первую очередь – разработчиков программного обеспечения (ПО). В среднесрочной перспективе на российском рынке труда ожидается рост спроса на разработчиков по таким перспективным направлениям, как искусственный интеллект (ИИ), анализ больших данных, робототехника, виртуальная реальность, Интернет вещей¹ [1, 2].

Технологии массового обучения разработчиков ПО требуют активного внедрения ИТ-технологий и интеллектуальных технологий в организацию учебного процесса и предполагают использование электронных образовательных ресурсов, поддержку удобной и быстрой коммуникации между участниками учебного процесса, применение передовых педагогических инноваций и практик.

Однако цифровизация учебного процесса для массового обучения разработчиков ПО не должна приводить к унификации подходов ко всем обучающимся. Наоборот, необходимо предоставлять обучающемуся широкие возможности в создании и поддержке персонализации обучения, в первую очередь, путем организации индивидуальных образовательных траекторий (ИОТ), предполагающих активную самостоятельную работу обучающегося. «Электронная культура создает условия доступности цифровых технологий для масс, повышая уровень их проникновения в социальную систему и все общественные отношения. Доступность этих технологий позволяет формировать новые картины мира и способы его познания. Человек в таких условиях формируется как постоянно развивающаяся, открытая

антропосистема. Человек в цифровом пространстве становится стремительно расширяющей свои возможности интерактивной системой, которая формирует и соответствующие параметры будущего» [3]. При этом часть педагогических научных школ отмечает, что наблюдается снижение мотивации обучающихся к самостоятельной работе. Есть мнение, что причиной этого является тот факт, что «в настоящее время учебный труд имеет черты принудительного труда» [4]. Существующие стандарты и программы освоения учебного материала дают обучающемуся не лично значимые образовательные результаты, а мотивируют выполнять заданные системой образования требования. Обучающиеся не обладают самостоятельностью в своих действиях: им навязывают цели, содержание и методы обучения, задают внешнюю систему контроля. «Мотивы к учению замещаются мотивами ответственности, социальной необходимости и принуждения: «ты должен», «обязан» [5].

Для повышения мотивации обучающихся существуют различные концепции типов обучения. Например, концепция эвристического обучения, базирующаяся на модели экстерниоризации, ставит целью самореализацию обучающегося [6, 7]. Концепция развивающего обучения, использующая модель интериоризации, нацелена на развитие обучающегося [6, 7]. Задачей преподавателя при эвристическом или развивающем обучении является не столько разработка контента курса (содержания лекций и практических занятий), а поиск и мониторинг доступных образовательных ресурсов, где могут быть представлены материалы образовательного контента курса. Таким образом создается ИОТ обучающегося. Необходимо отметить, что поддержка мотивации обучающегося к получению компетенций в области разработки ПО становится важной задачей и не сводится только к материальной стороне вопроса.

В области подготовки разработчиков ПО технические университеты, использующие классическую форму обучения программированию, давно конкурируют с качественными массовыми открытыми онлайн-курсами от ведущих фирм и образовательных центров и со специализированными платформами онлайн-образования, такими, как Stepik [8] и JetBrains Academy [9], предоставляющими инструменты для

¹ Рынок труда в России. *Tadviser. Gosudarstvo. Biznes. Tekhnologii*. <https://clck.ru/ZD5AU>, дата обращения 28.11.2021. [Rynok truda v Rossii (The labor market in Russia). *Tadviser. Gosudarstvo. Biznes. Tekhnologii* (in Russ.). <https://clck.ru/ZD5AU>. Accessed November 28, 2021.]

эффективного обучения языкам программирования, востребованным в текущий момент работодателями в области разработки ПО.

Реализация противоэпидемических мероприятий и использование онлайн-технологий в учебном процессе привели к тому, что «смешанная» форма организации обучения стала частью учебного процесса в университетах. Это изменило обязанности преподавателя добавлением функционала тьюторства – увеличился объем творческих функций преподавателя, связанных с наставничеством и необходимостью учета индивидуальных особенностей обучающегося при освоении практико-ориентированного курса по программированию. Очевидно, что нагрузка на преподавателя существенно увеличилась, и возникла необходимость автоматизации рутинной части его обязанностей путем создания и использования интеллектуальных цифровых помощников – или цифрового ассистента преподавателя (ЦАП). ЦАП может взять на себя функции выдачи и составления практических заданий по программированию, генерирования заданий и проверки результатов выполнения заданий, отслеживания посещаемости и работы обучающихся, сбора цифровых следов и т.п.

Разработка интеллектуальной обучающей системы – цифрового ассистента преподавателя, ее реализация и внедрение в преподавание учебного курса обучения программированию в техническом университете является актуальной задачей.

1. ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ПО ОБУЧЕНИЮ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

Современная ситуация в системе образования по обучению программированию предоставляет большие возможности преподавателю в постановке целей обучения и проектировании педагогического дизайна учебного курса, определяющего способы достижения поставленных целей. Педагогический дизайн – это систематизированный подход к созданию образовательных решений, использующий педагогические принципы и теории для обеспечения высокого качества обучения [10].

В контексте цифровизации обучения педагогический дизайн является эффективным инструментом разработки цифрового образовательного контента курса, призванного обеспечить разумное сочетание онлайн и офлайн обучения («смешанная» форма обучения), создания интеллектуальной среды курса обучения программированию, поддержки реализации ИОТ.

К базовым принципам педагогического дизайна относятся [10] следующие: наглядное объяснение

целей и задач обучения, привлечение и удержание внимания обучающегося, пробуждение интереса к изучаемой теме или методам обучения, быстрая апробация полученных знаний на практике, получение обратной связи от обучающегося, оценка и самооценка успеваемости и общая оценка эффективности учебного курса, помощь обучающемуся в сохранении полученных знаний и их правильном использовании.

Применение принципов педагогического дизайна при разработке контента учебного курса позволяет определить оптимальные условия для достижения целей обучения: модель интерактивного взаимодействия участников образовательного процесса, формы представления учебного контента курса, методы повышения мотивации обучающихся к самостоятельной работе над материалами курса (когнитивная функция). Например, применение методов краудсорсинга позволяет выявить образовательные запросы и образовательные дефициты, актуальные для обучающихся по данному курсу обучения программированию.

В рамках работы над педагогическим дизайном курса обучения программированию определяется не только формат отображения учебного контента, но разрабатываются методические указания для обучающихся и преподавателей, задания и упражнения по разработанному контенту, тестовые задания и формы самооценки обучающихся. Тестовые задания, их выполнение и последующая самооценка обучающимся своего образовательного уровня по курсу частично могут быть основаны на геймификации. Самооценка по определению обучающимся своего уровня компетентности может соответствовать событиям в электронной системе, например, таким, как прием выполненного задания по шкале «зачтено/незачтено», оценивание в балльно-рейтинговой системе и т.п. Для качественного контента учебного курса обязательно включение мотивационных стимулов, например, в виде творческих заданий, определения проблемного поля курса и т.п.

Обязательными элементами педагогического дизайна при проектировании практико-ориентированного курса обучению программированию являются следующие элементы:

- интерактивные материалы в онлайн-доступе (обучающийся может запускать примеры непосредственно в учебнике, использовать элементы встроенного графического интерфейса для обновления содержимого графиков и т.д.);
- изложение материалов в персонализированном виде – в виде графа зависимостей (графа знаний);
- онлайн-система приема и проверки задач;
- автоматическая адаптация сложности задач и теоретических материалов к уровню обучающегося;

- автоматическая генерация задач;
- автоматическая генерация подсказок и комментариев по решениям задач.

2. СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

Перспективным направлением проектирования педагогического дизайна университетского курса массового обучения программированию является использование инструментальных средств и режима «смешанного» обучения («blended learning»), включающего элементы очного и онлайн-обучения. Асинхронность онлайн-части образовательного процесса дает обучающемуся свободу выбора материала и времени на его изучение. Представляет интерес, в частности, модель перевернутого класса («flipped classroom»), предполагающая самостоятельное усвоение основных теоретических знаний по курсу в онлайн-режиме. Очные лекции при этом становятся более интерактивными, включают в себя обсуждения по самостоятельно изученным темам, широко используют дополнительные материалы и совместное решение задач.

Для удобства усвоения обучающимися материал традиционной полуторачасовой лекции в онлайн-режиме все чаще оформляется в виде набора коротких (5–15 мин.) видеофрагментов [11]. Растет популярность использования технологий виртуальной реальности в учебном процессе [11]. Для своевременной оценки степени изученности материала прямо в процессе онлайн-лекции может быть реализована обратная связь с обучающимися в виде кратких тестовых вопросов и тестовых задач. Особую роль в обеспечении глубокого усвоения лекционного материала могут играть такие интерактивные элементы лекции, как вставки исполняемого кода и различного рода наглядные динамические модели, управляемые с помощью графического интерфейса («explorable explanation») [12]. В частности, веб-приложение Python Tutor [13] позволяет в динамическом режиме наглядно изобразить детали выполнения программы на языке Python.

При организации массового курса по обучению программированию важно обеспечить персонализацию обучения в виде ИОТ, предполагающую адаптацию образовательного процесса под нужды обучающегося. Для режима лекции может быть использовано представление материала курса в виде графа знаний («knowledge graph») с возможностью свободы выбора между изучаемыми узлами-темами с учетом ребер-зависимостей [14].

В режиме выполнения практических занятий и в условиях количественных ограничений на

преподавательский состав интерес могут представлять интеллектуальные системы обучения (Intelligent Tutoring System, ITS), призванные обеспечить обратную связь с обучающимися или передачу индивидуальной инструкции или ответа на действия обучающихся в режиме реального времени без вмешательства преподавателя. Это компьютерные системы, включающие в себя модель области знаний, а также модели обучающегося и преподавателя. Такие интегрированные системы зачастую используют методы машинного обучения и отличаются высокой сложностью построения [15].

Сложность построения интеллектуальной системы обучения в виде единой системы, интегрирующей все ситуации и сценарии взаимодействия, привела к распространению компьютерных инструментов, решающих отдельные задачи, относящиеся к области интеллектуальных систем обучения. Это, в частности, системы автоматической проверки полученных от обучающихся решений [16], системы автоматического формирования подсказок в случае неправильного решения [17], а также системы автоматической генерации задач с заданной сложностью [18] и системы проверки решений на плагиат [19].

Среди недостатков подобных систем следует выделить их нацеленность исключительно на индивидуальную работу обучающегося, а также на ограниченный, формально определенный класс задач. В этой связи могут быть полезны специализированные форумы, такие, как Piazza², включающие средства поощрения обучающихся, помогающих своим коллегам. Важную роль также играет использование учебных проектов («project-based learning»), коллективно разрабатываемых обучающимися, и применение технологий геймификации учебного процесса [20].

3. ЦИФРОВОЙ АССИСТЕНТ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

3.1. Структура цифрового ассистента преподавателя

При проведении массовых университетских курсов по программированию большая часть учебной нагрузки приходится на ассистентов преподавателей, составляющих задачи по программированию и проверяющих правильность их решения обучающимися. В этой связи предлагается новый подход к организации учебного процесса подготовки разработчиков ПО, базирующийся на использовании компьютерной системы – цифрового ассистента преподавателя. Использование ЦАП позволяет

² <https://piazza.com/>, дата обращения 13.01.2022. [<https://piazza.com/>. Accessed January 13, 2022.]

преподавателям в условиях массового обучения сконцентрироваться на функциях, требующих творческого подхода и заключающихся, в частности, в составлении и обсуждении нетривиальных задач по программированию, а также – в развитии функциональности ЦАП.

К основным функциям ЦАП (рис. 1) относятся:

- генерация индивидуальных задач;
- проверка задач с информативным ответом для обучающегося;
- ведение статистики успеваемости обучающихся;
- интерфейс взаимодействия участников учебного процесса.

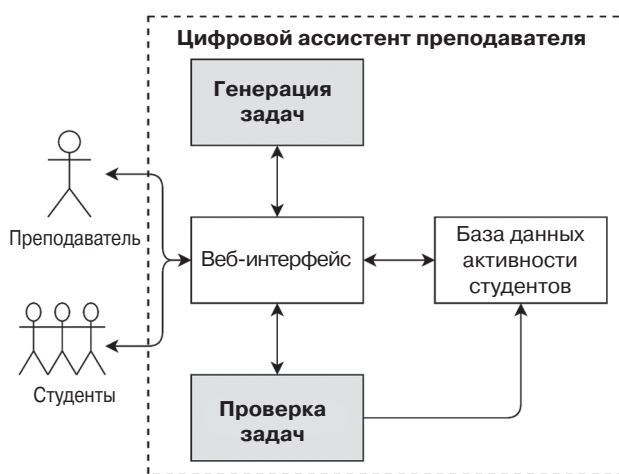


Рис 1. Структура цифрового ассистента преподавателя

В отличие от ИОС [21], ЦАП не предназначен для полной замены преподавателя и не является «черным ящиком», автоматически подбирающим задачи в процессе обучения и оценивающим решения в соответствии со скрытыми от обучающегося параметрами. Модель учителя, используемая в ИОС, заменена в ЦАП явными настройками со стороны учителя-человека.

3.2. Автоматическая генерация задач по программированию

Автоматическая генерация задач по программированию позволяет обеспечить каждого из множества обучающихся индивидуальным набором задач. Самостоятельно сделать это преподавателю затруднительно, а при большом количестве учащихся и невозможно. Также автоматическая генерация задач частично позволяет решить проблему плагиата решений.

Создание генераторов задач по программированию является трудоемким процессом.

К генератору задач предъявляются следующие требования:

- поддержка основных тем курса и конструкций языка;
- интересность, практическая полезность задач;
- ясность, однозначность текста условия и его схожесть с текстом, составленным людьми;
- одинаковая сложность всех генерируемых вариантов задачи при фиксированных настройках генератора задач;
- отсутствие явных шаблонных решений для различных вариантов задачи;
- возможность автоматической проверки решения.

В составе ЦАП имеется множество генераторов задач $G = \{g_1, \dots, g_n\}$, каждый из которых генерирует варианты задач своего типа. Функция-генератор задач $g_i(h, s)$ принимает на вход хеш-значение индивидуальных данных обучающегося (h), параметр сложности или размера задачи (s).

Далеко не для всех типов задач по программированию известны подходы к их автоматическому генерированию. Далее рассматриваются те типы задач, для которых соответствующие генераторы были созданы.

В рамках курса обучения программирования на некотором языке можно выделить следующие классы практических задач, отражающие современную специфику разработки ПО:

- составление новой программы;
- анализ существующей программы;
- составление модульных тестов для существующей программы.

Среди задач, направленных на составление новой программы, известны [20] генераторы задач для таких видов задач, как:

- трансляция некоторого представления в код программы;
- преобразование форматов данных.

В задачах первого вида входным представлением может быть математическая формула. Таким образом обучающийся учится практически важному навыку перевода математического языка на язык программирования. Другим примером задачи первого вида является перевод программы с одного языка программирования на другой. В качестве входного представления может использоваться и графическая нотация. Примерами задач, использующих графическую нотацию, является перевод графа конечного автомата или UML-диаграммы в программный код.

В задачах преобразования входного формата данных в выходной формат могут использоваться как текстовые, так и двоичные форматы данных.

В общем виде генераторы задач рассмотренных видов могут быть реализованы с использованием подходов из области комбинаторных задач ИИ. В частности, перспективным является

использование подхода на основе удовлетворения ограничениям [22]. При использовании этого подхода множество переменных и их областей значений описывают пространство генерируемых программ или форматов данных, а множество ограничений позволяет отфильтровать только те результаты, которые соответствуют заданным характеристикам для выбранного типа задач.

Случайная конфигурация p (программа или описание формата данных) из пространства конфигураций P определяется следующим образом:

$$p \in P \wedge \phi_c(p) \wedge \phi_t(p).$$

Здесь предикат-спецификация ϕ_c определяет условия отбора p , а предикат ϕ_t отражает возможность создания для p набора невырожденных (т.е. с разнообразными значениями в заданных пределах) программных тестов.

Порождение случайных конфигураций может быть осуществлено с помощью вероятностных грамматик, в которых каждое правило дополнено вероятностью его применения в процессе порождения результата. Этот же подход используется в области фаззинг-тестирования [23].

Особенный интерес представляют вероятностные контекстно-зависимые грамматики, позволяющие при порождении случайного результата добиться не только синтаксически корректного результата, но и осуществить ряд семантических проверок. Примером такой проверки является проверка на корректное использование ранее определенной переменной в своей области видимости.

При генерации задачи недостаточно сформировать ее условие. Необходимо также получить множество программных тестов, на которых будет проверяться корректность решений обучающихся. Этап генерации тестов является частью общего процесса

генерации задачи. При неудовлетворительном качестве полученных тестов условие задачи необходимо изменить.

Помимо простых модульных тестов, содержащих множество пар $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, где x_i – вектор входных значений, а y_i – результат вычисления, могут использоваться тесты с отслеживанием состояния для реагирующих систем. Входные данные в этом случае – это трасса, состоящая из вызовов (методов, сообщений) и соответствующих каждому вызову реакций системы.

Среди типичных задач по программированию, связанных с анализом корректности существующих программ, интерес могут представлять генераторы, позволяющие по набору шаблонов программ создать их вариации, а также внести в программный код ошибку, исправление которой поручается обучающемуся.

Класс задач, связанных с созданием программных тестов, характеризуется использованием мутационного тестирования [24] для определения качества программных тестов, составленных обучающимся для автоматически сгенерированной программы.

3.3. Реализация генераторов задач

На рис. 2 показана общая схема генератора задач по программированию. На основе хеш-кода информации об обучающемся и параметра сложности задачи формируется условие задачи, а также программные тесты для автоматической проверки решений.

Генератор случайных конфигураций, возможная реализация которого изложена далее, формирует случайную программу или случайный формат данных. Конфигурация далее подвергается последовательности упрощений ее структуры. В случае порождаемой программы это могут быть традиционные

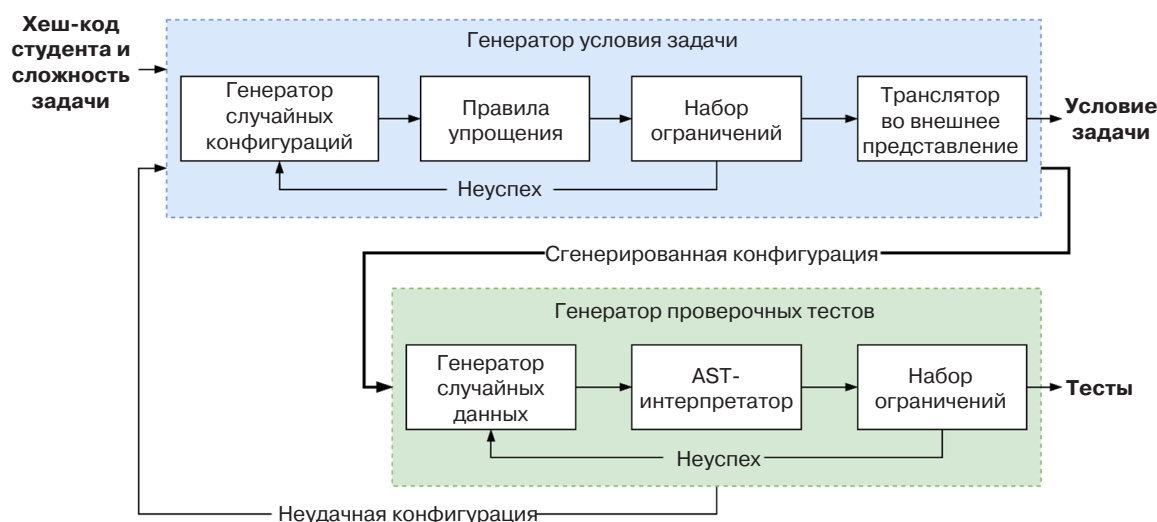


Рис. 2. Схема генератора задач по программированию

оптимизации со стороны компилятора, такие, например, как свертка констант и упрощение выражений. Характеристики конфигурации оцениваются с помощью набора ограничений. Эти ограничения, в частности, позволяют сделать однородной сложность генерируемых задач. Успешно сгенерированная конфигурация транслируется во внешнее представление, представляющее собой условие задачи для обучающегося.

Генератор проверочных тестов создает случайные данные в соответствии с типом формируемой задачи. Полученная ранее конфигурация оценивается с помощью набора тестов. В случае конфигурации-программы осуществляется интерпретация ее внутреннего представления в виде дерева абстрактного синтаксиса (Abstract Syntax Tree, AST) с использованием случайных данных в качестве входов программы. В случае конфигурации-формата данных соответствующие структуры заполняются случайными значениями. Если набор тестов с заданными характеристиками сформировать не удалось (например, после заданного числа попыток), то осуществляется возврат к порождению новой конфигурации.

Для реализации генератора случайных конфигураций предлагается использовать специальный язык, описывающий грамматику – правила порождения конфигураций. Этот язык является расширением вероятностных контекстно-зависимых грамматик и представляет собой набор комбинаторов в духе функционального программирования.

Комбинаторы – функции высшего порядка, использующиеся для создания встроенных предметно-ориентированных языков (Embedded Domain-Specific Language, eDSL). Известно, в частности, множество реализаций комбинаторов синтаксического разбора [25]. В рассматриваемом случае комбинатор после вычисления аргументов возвращает лексическое замыкание f :

$$f: c \rightarrow c'.$$

```

1 coeff = alt(randint(-100, 100), 0, prob=[0.3, 0.7])
2
3 term = λ k, n: mul(k, power('x', n))
4
5 main = find(seq(
6   let(a=coeff), let(b=coeff),
7   let(c=coeff), let(d=coeff),
8   add(
9     term(ref('a'), 3),
10    term(ref('b'), 2),
11    term(ref('c'), 1),
12    term(ref('d'), 0),
13  ),
14  check(λ c: c.a != 0 or c.b != 0 or c.c != 0)
15 ))

```

(a)

$$\begin{aligned}
 &86x^3 + 20x^2 - 27 \\
 &\quad - 85x \\
 &\quad - 98x \\
 &86x^3 + -47x^2 + 51x \\
 &\quad 40x + 44 \\
 &\quad 93x \\
 &\quad - 63x + -66 \\
 &\quad - 62x^3 + -17x \\
 &\quad - 97x^2 \\
 &\quad 94x^2
 \end{aligned}$$

(б)

Рис. 3. Генератор случайных многочленов:

(a) реализация на eDSL; (б) примеры результатов генерации в формате LaTeX


```

1 args = shuffle_list(
2     decl_ptr(ref('ty'), ref('buf1')), decl_ptr(ref('ty'), ref('buf2')),
3     decl('int', ref('size'))
4 )
5 for_array = λ *body: for_loop(
6     eq(decl('int', ref('idx')), ref('mtap')), lt(ref('idx'), ref('size')),
7     postop('++', ref('idx')), block(*body)
8 )
9 memset = call('memset',
10     lst(ref('buf2'), 0, mul(call('sizeof', ref('ty')), ref('size'))))
11 )
12 loop_body = stmt(eq(load(ref('buf2'), ref('idx')), expr))
13 main = seq(
14     let(ty=one_of('int float double')),
15     let(name=one_of('data buf arr x y')),
16     let(buf1=to(λ c: c.name + '1')), let(buf2=to(λ c: c.name + '2')),
17     let(size=to(λ c: c.buf1 + '_size')),
18     let(idx=one_of('i j k n')),
19     let(taps=to(λ c: sorted(sample(range(1, 5), randint(1, 3))))),
20     let(mtap=to(λ c: max(c.taps))),
21     function(
22         one_of('calculate process compute perform'),
23         'void', args, block(stmt(memset),
24             alt(for_array(loop_body), while_array(loop_body)))
25     )
26 )
27 )

```

Рис. 4. Реализация генератора случайных функций обработки массива

с вероятностью, заданной в *prob*. Правило *term* формирует AST-представление для выражения вида kx^n . Правило *main* формирует AST-представление многочлена до третьей степени. Комбинатор *let* позволяет именовать результаты вычислений, а *ref* позволяет далее обратиться к этим результатам. С помощью комбинатора *check* установлено ограничение – порожаемый многочлен должен иметь хотя бы один ненулевой коэффициент при x .

Поиск корректного результата осуществляет комбинатор *find*. Таким образом реализована простая декларативная система программирования в ограничениях. Производительность этого подхода значительно уступает, например, SMT-решателям и специализированным решателям для задач программирования в ограничениях. Тем не менее, рассматриваемый декларативный язык позволяет использовать ограничения произвольной сложности. Кроме того, скорость генерации обычно не является наиболее важной характеристикой для создания учебных задач. Наконец, SMT-решатели и другие сторонние инструменты можно использовать совместно с рассматриваемым комбинаторным языком.

На рис. 4 приведен более развернутый пример, реализующий генерацию случайных функций на языке C++ для обработки массивов. Здесь имитируется задача в духе реализации фильтров с конечной импульсной характеристикой.

В порождаемых случайных функциях согласованы типы данных и имена переменных. Цикл может быть реализован как с помощью *for*, так и с помощью *while* (реализация которого аналогична *for*). Реализация комбинатора *expr* не показана, поскольку не представляет ничего нового по сравнению с предыдущим примером порождения многочленов.

На рис. 5 приведены некоторые примеры порожденных случайных функций.

```

void process(int x_size, double *y, double *x) {
    memset(y, 0, sizeof(double) * x_size);
    for (int i = 4; i < x_size; i++) {
        y[i] = 8 * x[i] + 2 * x[i - 1] + -4 * x[i - 3] + -5 * x[i - 4];
    }
}

void perform(float *arr1, int arr1_size, float *arr2) {
    memset(arr2, 0, sizeof(float) * arr1_size);
    int k = 2;
    while (k < arr1_size) {
        arr2[k] = 5 * arr1[k] + 8 * arr1[k - 2];
        k++;
    }
}

void compute(int y1_size, float *y2, float *y1) {
    memset(y2, 0, sizeof(float) * y1_size);
    for (int k = 3; k < y1_size; k++) {
        y2[k] = -6 * y1[k] + -7 * y1[k - 3];
    }
}

```

Рис. 5. Примеры сгенерированных случайных функций обработки массива на C++

3.4. Автоматическая проверка задач

Проверка корректности полученного решения осуществляется с помощью набора программных тестов, сформированного генератором задач. Для тестирования реализуется «песочница» – среда безопасного выполнения программного кода.

Целесообразно дать комплексную оценку решению обучающегося, не ограничиваясь только проверкой корректности результата. Элементами такой оценки, получаемой автоматически, могут быть:

- проверка на плагиат решений в случае задач, созданных преподавателями вручную;
- проверка на соответствие стандарту стиля написания программы;
- анализ метрик оценки сложности программы;
- оценки корректности результата, вычислительной сложности программы, объема используемой программой памяти.

Первые 3 элемента списка могут быть реализованы с помощью инструментов статического анализа, а последние – с помощью инструментов профилирования программы.

При некорректном решении ответ ЦАП должен включать в себя, как минимум, сообщение от компилятора и указание невыполненного теста.

Более информативный ответ включает в себя указание на типовую ошибку, совершенную обучающимся. Такой механизм может быть реализован с помощью поиска шаблонов в дереве абстрактного синтаксиса некорректной программы. Правила вида «шаблон-сообщение» добавляются в ЦАП преподавателем. Существуют также подходы, позволяющие генерировать на основе некорректного решения автоматические подсказки, направляющие обучающегося в сторону корректного результата [26].

3.5. Ведение статистики успеваемости обучающихся

Результаты полученных от обучающихся решений сохраняются в базе данных ЦАП. Это позволяет преподавателю отказаться от ручного заполнения журнала успеваемости. Кроме того, комплексная оценка решений со стороны ЦАП дает возможность отказаться от упрощенных формул расчета итоговой оценки, а также от готовых наборов задач. Преподаватель может, например, ограничиться указанием минимально необходимого количества решенных задач для каждой из тем курса. В то же время ЦАП предоставляет обучающемуся возможность неограниченной тренировки на задачах, сложность и тип которых можно варьировать.

3.6. Интерфейс взаимодействия обучающихся и преподавателей

Для ЦАП является предпочтительным веб-интерфейс, позволяющий осуществить доступ к системе с любого устройства, подключенного к интернету.

С точки зрения обучающегося интерфейс должен позволять осуществлять выбор типов и параметров задач, относящихся к текущей изучаемой теме. Данные комплексной оценки предоставляются вместе с историей предыдущих результатов, что позволяет обучающемуся оценить свой прогресс.

С точки зрения преподавателя важную роль играет анализ данных, связанных с активностью обучающихся. С использованием интерфейса ЦАП преподаватель может вовремя оценить ситуацию и принять нужное решение. Это касается, например, ситуации, когда задача оказалась слишком легкой или сложной для большинства обучающихся. Анализ данных может быть использован для определения отстающих или для получения прогноза итоговой оценки по обучающемуся.

4. ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КУРСА ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА ЯЗЫКЕ PYTHON

Курс обучения программированию на языке Python в РТУ МИРЭА организован в режиме смешанного обучения. Онлайн-инструменты, используемые в этом курсе, представлены на рис. 6.

Преподавательский состав курса представлен 4 лекторами и 13 преподавателями практических занятий. В обучении приняло участие свыше 1500 студентов, и для их своевременного оповещения о важных событиях курса был создан телеграм-канал. В качестве двустороннего канала общения была использована система отслеживания ошибок MantisBT, уже знакомая обучающимся по курсу конфигурационного управления, используемая как замена традиционным средствам взаимодействия (электронная почта и форум).

Лекции содержат базовую часть дисциплины, включающую в себя вопросы использования основных конструкций языка и введение в стиль объектно-ориентированного программирования (ООП), принятый в языке Python. В заключительных лекциях рассмотрен ряд специальных вопросов, в частности:

- автоматизация тестирования: метрики тестового покрытия кода, мутационное тестирование, контрактное программирование, тестирование на основе свойств и моделей,
- функциональное программирование: функции высших порядков, замыкания, декораторы, генераторы, неизменяемые типы данных, модули `functools` и `itertools`, библиотека `NumPy`.

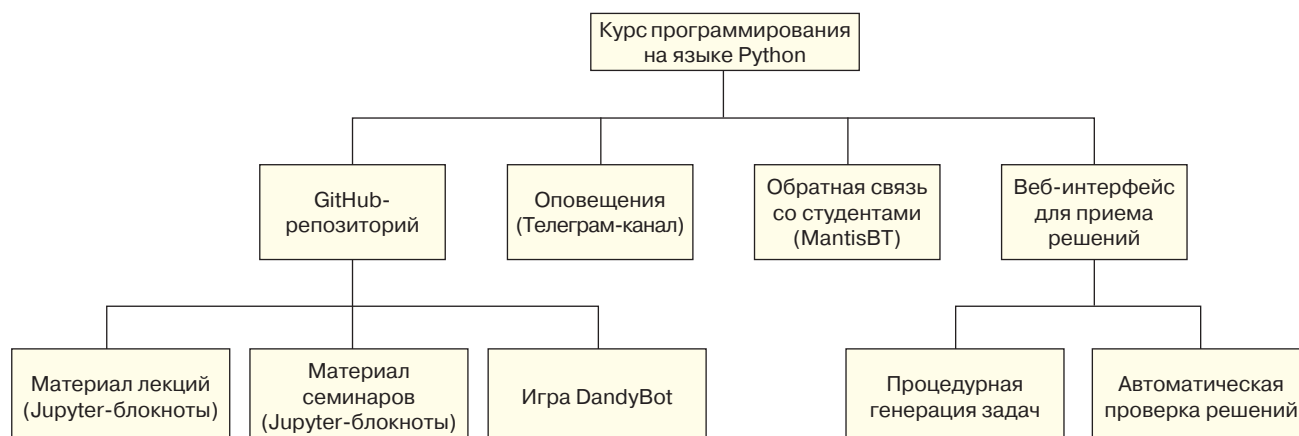


Рис. 6. Структура онлайн-части курса программирования на языке Python

Основные материалы курса размещены в отдельном GitHub-репозитории. При этом обучающимся обеспечиваются оповещения за найденные ошибки в материалах. Сообщения о найденных ошибках принимаются в режиме «pull request».

Использование Jupyter-блокнотов позволило сделать онлайн-лекции, проводимые в формате вебинара, более интерактивными. Непосредственно в процессе лекции обучающиеся экспериментируют с предложенными им короткими программами, а лектор, реагируя в том числе на вопросы обучающихся, имеет возможность модифицировать и запустить примеры программ в ячейках Jupyter-блокнота. Представление материала лекции в традиционном виде слайдов, но с добавленной интерактивностью ячеек, осуществляется с помощью расширения RISE для Jupyter-блокнотов.

Очное семинарское занятие включает в себя интерактивную теоретическую часть, которая дает возможность:

- оценить уровень усвоения обучающимися в режиме онлайн лекционного материала и, при необходимости, оперативно устранить пробелы в знаниях;
- ввести обучающихся в предметную область рассматриваемых на занятии задач.

На семинарских занятиях используется несколько типов задач:

- процедурно сгенерированные задачи;
- задачи из Jupyter-блокнотов;
- задачи, которые относятся к игре DandyBot;
- творческие проекты по темам преподавателей, индивидуальные и групповые.

Одной из основных проблем проектирования рассматриваемого курса были создание и организация оперативной проверки практических задач в условиях массового обучения с участием небольшого коллектива преподавателей. Было принято решение использовать подход на основе процедурной генерации: для каждого из обучающихся автоматически

формировался свой, индивидуальный набор задач [18]. Такой подход позволил решить проблему плагиата среди обучающихся, а также снизил нагрузку на преподавателей, благодаря автоматической проверке решений.

Так, вариации следующих задач генерируются автоматически:

- 1) преобразование математической нотации в код: арифметические выражения;
- 2) преобразование математической нотации в код: ветвления;
- 3) преобразование математической нотации в код: циклы;
- 4) преобразование математической нотации в код: рекурсия;
- 5) преобразование дерева решений в код;
- 6) реализация перестановки битовых полей в двоичном слове;
- 7) преобразование табличного формата данных (рис. 7);
- 8) разбор двоичного файлового формата (рис. 8);
- 9) реализация конечного автомата средствами ООП.

Для генерируемой задачи может быть задана степень ее сложности, а также количество сформированных тестов, позволяющих обучающемуся проверить корректность своего решения.

Важную роль играет информативность сообщений, полученных обучающимися от системы, принимающей решения задач. Для некоторых типов задач реализована поддержка правил, позволяющих по найденному в коде решения шаблону выдать детальное сообщение об ошибке, сопровождаемое ссылкой к методам получения верного решения. Поиск по шаблону осуществляется на уровне представления программы студента в виде дерева абстрактного синтаксиса. В задаче на перестановку битовых полей такие правила позволяют выявить некорректный подход к решению (наличие функции перевода числа в строку) и подсказать правильное направление (использование побитовых операций).

Задача 3. Реализовать функцию преобразования табличных данных. Входная и выходная таблицы заданы в построчной форме. Заполненные ячейки имеют строковый тип данных. Пустые ячейки имеют значение None.

Над входной таблицей реализовать ряд преобразований:

- удалить пустые столбцы;
- разбить столбец № 1 по разделителю «!»;
- преобразовать содержимое ячеек по примерам;
- транспонировать таблицу.

Примеры табличных преобразований:

1. Исходная таблица:

	+78694947943!03-08-2003	Нет
	+79774177489!27-03-2002	Да
	+77571568485!05-12-2001	Да
	+73113372701!21-07-2003	Нет

Результат преобразования:

8694947943	9774177489	7571568485	3113372701
false	true	true	false
03-08-03	02-03-27	01-12-05	03-07-21

2. Исходная таблица:

	+76058136232!11-04-2001	Нет
	+72178434337!02-10-2000	Нет
	+76826857881!25-11-2003	Да

Результат преобразования:

6058136232	2178434337	6826857881
false	false	true
01-04-11	00-10-02	03-11-25

Рис. 7. Пример автоматически сгенерированной задачи преобразования табличных данных

Зачет по курсу языка Python также проходит с использованием процедурно сгенерированных задач. На рис. 9 представлен веб-интерфейс, с помощью которого обучающиеся присылают свои решения этого типа задач.

Основная часть семинарского занятия приходится на обсуждение и решение практических задач из Jupyter-блокнотов. Несколько таких задач разбираются «у доски»: преподаватель предлагает кому-то из обучающихся занять место у компьютера, подключенного к проектору аудитории. В таком формате остальные обучающиеся могут следить за ходом решения и комментариями преподавателя. Более подготовленные обучающиеся в процессе занятия самостоятельно решают задачи и присылают решения на проверку преподавателю через систему отслеживания ошибок. Такая схема работы позволяет преподавателю активно участвовать в занятии, не перемещаясь постоянно по аудитории от компьютера к компьютеру и, тем самым, более строго следовать ограничениям в условиях пандемии COVID-19. Внезапный переход на дистанционную форму обучения при такой схеме практического занятия

Задача 3.1. Реализовать разбор двоичного формата данных (в духе формата WAD игры Doom или графического формата PNG). Данные начинаются с сигнатуры $0 \times 42, 0 \times 58, 0 \times 59, 0 \times 9a$, за которой следует структура A. Порядок байт: от старшего к младшему. Адреса указаны в виде смещений от начала данных. В решении разрешено использовать модуль struct.

1	Массив структур B, размер 4
2	int16
3	int16
4	int16
5	Структура C
6	Размер (uint32) и адрес (uint32) массива double
7	uint32
8	Структура D

1	uint32
2	double
3	Размер (uint32) и адрес (uint32) массива char

1	Массив int16, размер 5
2	uint64
3	int16
4	int8

1	int16
2	int8
3	int8
4	uint64
5	Размер (uint32) и адрес (uint32) массива uint16

Рис. 8. Пример автоматически сгенерированной задачи разбора двоичного файлового формата (тестовые данные не показаны)

Зачет по курсу программирования на языке Python

Группа Вариант

Решение:

```
import struct

def f31(x):
    res = {}
    res['A1'] = struct.unpack('f', x[3:7])[0]
    res['A2'] = struct.unpack('q', x[7:15])[0]
    res['A3'] = {}
    addr = x[15] + x[16] * 16 + x[17] * 16 * 16 + x[18] * 16 * 16 * 16
    res['A3']['B1'] = struct.unpack('q', x[addr: addr + 8])[0]
    res['A3']['B2'] = struct.unpack('H', x[addr + 8: addr + 10])[0]
    res['A3']['B3'] = struct.unpack('b', x[addr + 10: addr + 11])[0]
    res['A4'] = struct.unpack('h', x[19:21])[0]
    res['A5'] = {}
    res['A5']['C1'] = ""
    size = x[21] + x[22] * 16 + x[23] * 16 * 16 + x[24] * 16 * 16 * 16
    addr = x[25] + x[26] * 16 + x[27] * 16 * 16 + x[28] * 16 * 16 * 16
    for i in range(addr, addr + size):
        res['A5']['C1'] += chr(x[i])
    res['A5']['C2'] = []
    size = x[29] + x[30] * 16
    addr = x[31] + x[32] * 16
    for i in range(size):
        res['A5']['C2'].append(i)
    res['A5']['C2'][i]['D1'] = struct.unpack('H', x[addr + 4 * i: addr + 2 * 4 * i])[0]
    res['A5']['C2'][i]['D2'] = struct.unpack('H', x[addr + 2 * 4 * i: addr + 4 * 4 * i])[0]
```

[Таблица результатов](#)
[Журнал ошибок](#)

Рис. 9. Веб-интерфейс для приема решений автоматически сгенерированных задач

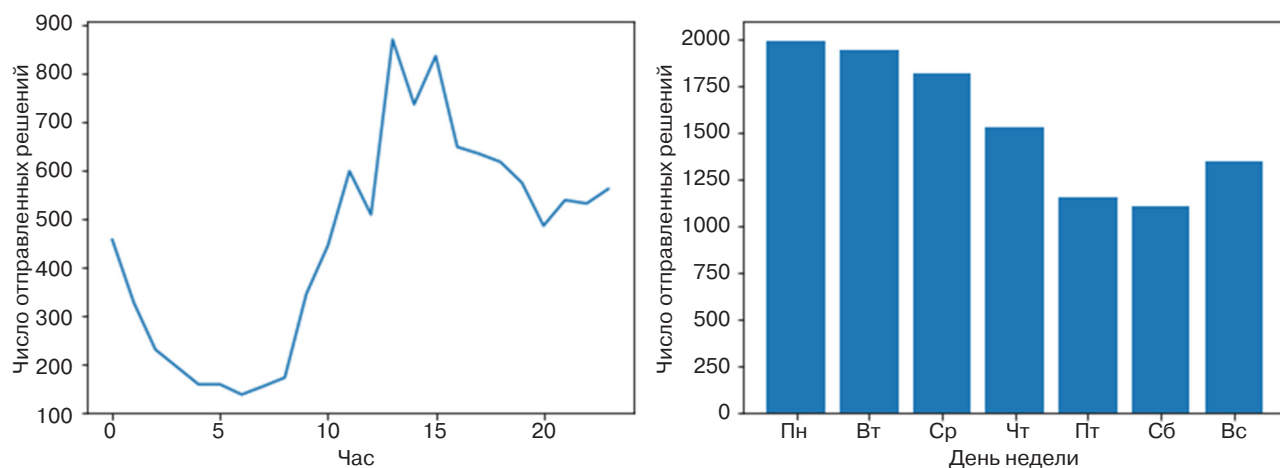


Рис. 10. Активность обучающихся в течение суток и дней недели

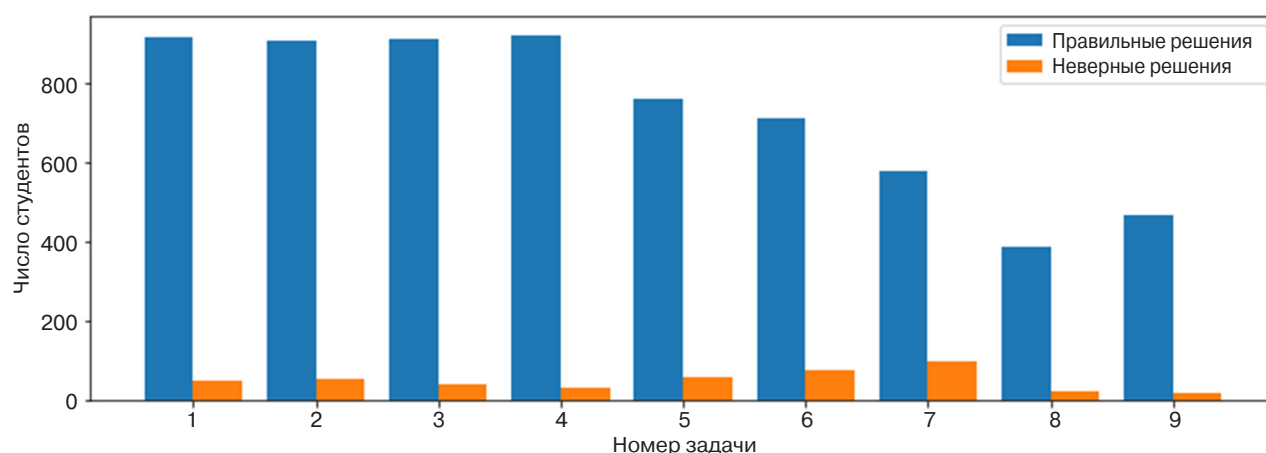


Рис. 11. Статистика по отправленным обучающимися решениям процедурно сгенерированных задач

не является серьезной проблемой, поскольку обучающиеся пользуются для отправки решений задач все той же системой отслеживания ошибок.

Практические задачи из Jupyter-блокнотов относятся к различным предметным областям и разработаны таким образом, чтобы представлять интерес для студентов, а также обеспечить возможность получить решение в течение одного практического занятия. В качестве тем практических задач используются следующие: генератор случайных докладов по цифровой экономике, преобразование Барроуза – Уиллера, генератор ASCII-баннера, модель сегрегации Шеллинга, изображение графа на основе физического моделирования, интерпретатор стекового языка, алгоритм иерархической кластеризации, формальная верификация головоломок из компьютерных игр, механизм undo/redo в графическом редакторе, язык запросов в духе SQL, фрактал Жюлиа, алгоритм Флойда – Стейнберга.

Отдельным видом практических задач являются задачи простого анализа данных на основе информации, собранной с помощью веб-инструмента для приема студенческих решений

процедурно-сгенерированных задач. Здесь в режиме рефлексии обучающиеся изучают собственную активность на курсе. Примеры такого анализа показаны на рис. 10 и рис. 11.

Дополнительные задачи для практических занятий связаны со специально разработанной для рассматриваемого курса игрой DandyBot. Она относится к жанру игр для программистов, в которых для успеха в игре необходимо написать программный код. Игра DandyBot, пример уровня которой показан на рис. 12, выдержана в стилистике Roguelike-игр и позволяет запрограммировать на языке Python «интеллект» игровых персонажей.

На первых уровнях играющим требуется писать простейшие программы, что дает возможность привлечь к написанию кода на Python в игровой форме даже тех обучающихся, которые имеют минимальный опыт программирования.

Игра DandyBot в виде GitHub-репозитория, с которым работают обучающиеся, представляет собой заготовку, требующую многочисленных доработок. Это стимулирует обучающихся к развитию программного кода проекта DandyBot, а также к созданию дополнительных уровней.

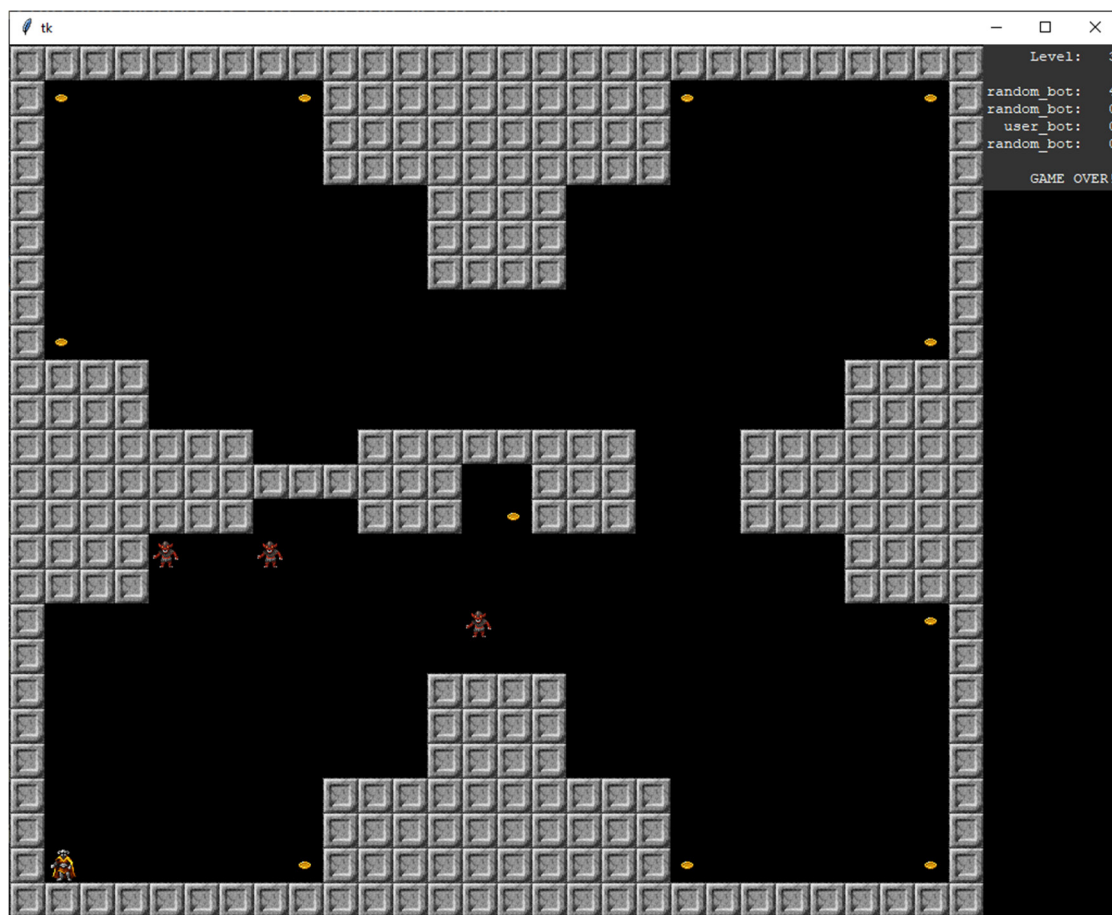


Рис. 12. Уровень игры DandyBot с управляемым программой на языке Python игроком

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных условиях (массовое обучение программированию, переход с очной формы обучения на дистанционное/смешанное и обратно в течение семестра, конкуренция со специализированными курсами и платформами обучения языкам программирования) преподаватели университетских курсов по обучению программированию сталкиваются с существенным увеличением нагрузки, связанным в большинстве случаев с выполнением рутинных действий.

Применение разработанного цифрового ассистента преподавателя, автоматизирующего такие процедуры, как генерация индивидуальных задач и проверка их решения с информативным ответом для обучающегося, ведение статистики успеваемости обучающихся, позволяет преподавателю уделить больше рабочего времени и внимания функциям, требующим творческого подхода, в частности, составлению и обсуждению нетривиальных задач по программированию.

Опыт внедрения ЦАП в учебный процесс курса «Программирование на языке Python» подтвердил возможность обеспечения персонализации учебного процесса для обучающихся в виде ИОТ.

Вклад авторов

Е.Г. Андрианова: Обоснована актуальность автоматизации процесса массового обучения программированию. Исследованы и адаптированы методы персонализации учебного процесса для массового обучения программированию, выделены классы практических задач, отражающих современную специфику разработки программного обеспечения.

Л.А. Демидова: Предложена процедура комплексной оценки решения обучающегося, включающая проверку корректности результата и проверку на плагиат решений в случае задач, созданных преподавателем вручную, а также соответствие стандарту стиля написания программы, метрикам оценки сложности программы и т.д. Описаны ведение статистики успеваемости обучающихся и интерфейс взаимодействия обучающихся и преподавателей.

П.Н. Советов: Разработаны алгоритмы, удовлетворяющие ограничениям для создания генераторов задач по программированию, построена архитектура системы «Цифровой Ассистент Преподавателя» и выполнена реализация данной системы. Разработана и описана процедура автоматической проверки решения задач, осуществляемая с помощью набора программных тестов, сформированного генератором задач.

Все авторы – разработка и внедрение системы «Цифровой Ассистент Преподавателя» в практику учебного процесса РТУ МИРЭА по дисциплине «Программирование на языке Python».

Authors' contributions

E.G. Andrianova: The urgency of automating the process of massive programming training was substantiated. The personification methods for the massive programming training process were investigated and adapted. Types of practical tasks reflecting the contemporary specifics of software development were highlighted.

L.A. Demidova: A procedure for a comprehensive assessment of the student's solution was proposed. This procedure included checking the correctness of the result and checking for plagiarism of solutions in the case of tasks created by the teacher manually, as well as compliance of the program style with the standard and metrics for assessing the program complexity, etc. The maintenance

of statistics of students' progress and the interface of interaction between students and teachers are described.

P.N. Sovetov: Algorithms satisfying the constraints for creating generators of programming tasks were developed, the Digital Teaching Assistant computer system architecture was built, and the implementation of this system was completed. A procedure for automatic verification of task solutions was developed and described. This procedure is realized using software tests generated by the task generator. He

All authors took part in the development and implementation of the Digital Teaching Assistant computer system in the practice of the RTU MIREA educational process in the Programming in Python discipline.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудов М.М., Ермакова Э.Р. Структурные преобразования российской экономики в условиях форсированной цифровизации производственных отношений. *Теоретическая и прикладная экономика*. 2020;2:1–8. <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2020.2.32625>
2. Новикова Е.С. Риски и перспективы трансформации высшей школы для российской экономики в условиях глобализации и цифровизации. *Международная торговля и торговая политика*. 2021;7(4):147–162. <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2021-3-147-162>
3. Ярославцева Е.И. Гуманитарные аспекты цифровых технологий. *Вестник Российского философского общества*. 2020;1–2(91–92):248–251. URL: https://rfo1971.ru/wp-content/uploads/2020/03/09-03_248-251.pdf
4. Ярославцева Е.И. Потенциал цифровых технологий и проблемы творчества человека. *Вопросы философии*. 2020;11:58–66. <https://doi.org/10.21146/0042-8744-2020-11-58-66>
5. Строков А.А. Цифровизация образования: проблемы и перспективы. *Вестник Мининского университета*. 2020;8(2):15. <https://doi.org/10.26795/2307-1281-2020-8-2-15>
6. Хуторской А.В. Педагогические предпосылки самореализации ученика в эвристическом обучении. *Вестник Института образования человека*. 2020;1:1. URL: <http://eidos-institute.ru/journal/2020/100/Eidos-Vestnik2020-101-Khutorskoy.pdf>
7. Хуторской А.В. Интериоризация и экстериоризация – два подхода к образованию человека. *Народное образование*. 2021;1(1484):37–49.
8. Khalyapina L., Kuznetsova O. Multimedia professional content foreign language competency formation in a digital educational system exemplified by STEPIK framework. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020;131:357–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47415-7_38
9. Панова И.В., Коливнык А.А. Обзор содержания онлайн курсов по обучению основам программирования на языке Python. В: *Современные образовательные Web-технологии в реализации личностного потенциала обучающихся*. сборник статей участников Международной научно-практической конференции. Арзамас; 2020. С. 523–528.

REFERENCES

1. Gudov M.M., Ermakova E.R. Structural transformations of the Russian economy in the conditions of acceleration digitalization of industrial relations. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekonomika = Theoretical and Applied Economics*. 2020;2:1–8 (in Russ.). <https://doi.org/10.25136/2409-8647.2020.2.32625>
2. Novikova E.S. Risks and perspectives of higher school transformation for the Russian economy in conditions of globalization and digitalization. *Mezhdunarodnaya trgovlya i trgovaya politika = International Trade and Trade Policy*. 2021;7(4):147–162 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2021-3-147-162>
3. Yaroslavtseva E.I. Humanitarian aspects of digital technologies. *Vestnik Rossiiskogo filosofskogo obshchestva = Russian Philosophical Society*. 2020;1–2(91–92):248–251 (in Russ.). Available from URL: https://rfo1971.ru/wp-content/uploads/2020/03/09-03_248-251.pdf
4. Yaroslavtseva E.I. The potential of digital technologies and the problems of human creativity. *Voprosy Filosofii*. 2020;11:58–66 (in Russ.). <https://doi.org/10.21146/0042-8744-2020-11-58-66>
5. Stokov A.A. Digitalization of education: problems and prospects. *Vestnik Mininskogo universiteta = Vestnik of Minin University*. 2020;8(2):15 (in Russ.). <https://doi.org/10.26795/2307-1281-2020-8-2-15>
6. Khutorskoi A.V. Pedagogical prerequisites for student self-realization in heuristic learning. *Vestnik Instituta Obrazovaniya Cheloveka*. 2020;1:1 (in Russ.). Available from URL: <http://eidos-institute.ru/journal/2020/100/Eidos-Vestnik2020-101-Khutorskoy.pdf>
7. Khutorskoi A.V. Interiorization and exteriorization – two approaches to human education. *Narodnoe obrazovanie*. 2021;1(1484):37–49 (in Russ.).
8. Khalyapina L., Kuznetsova O. Multimedia professional content foreign language competency formation in a digital educational system exemplified by STEPIK framework. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020;131:357–366. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47415-7_38
9. Panova I.V., Kolivnyk A.A. An overview of the content of online courses on teaching the basics of programming in the Python language. In: *Sovremennye obrazovatel'nye Web-tehnologii v realizatsii lichnostnogo potentsiala obuchayushchikhsya (Contemporary Educational Web-technologies in the Realization of the Personal Potential of Students)*: Collection of research articles of international scientific and practical conference. Arzamas; 2020. P. 523–528 (in Russ.).

10. Воробьева Н.А., Обоева С.В., Бернадинер М.И. Использование технологий педагогического дизайна в условиях цифровизации образования. *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования*. 2020;1(51):34–37.
11. Guo P.J., Kim J., Rubin R. How video production affects student engagement: An empirical study of MOOC videos. In: *Proceedings of the First ACM Conference on Learning @ Scale Conference*. 2014. P. 41–50. <https://doi.org/10.1145/2556325.2566239>
12. Lau S., Guo P.J. Data theater: a live programming environment for prototyping data-driven explorable explanations. *Workshop on Live Programming (LIVE)*. 2020. 6 p. URL: https://www.samlau.me/pubs/Data-Theater-prototyping-explorable-explanations_LIVE-2020.pdf
13. Guo P.J. Online python tutor: embeddable web-based program visualization for cs education. In: *Proceeding of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*. 2013. P. 579–584. <https://doi.org/10.1145/2445196.2445368>
14. Miller H., Willcox K., Huang L. Crosslinks: Improving course connectivity using online open educational resources. *The Bridge*. 2016;43(3):38–45. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/117022>
15. Utterberg M.M., et al. Intelligent tutoring systems: Why teachers abandoned a technology aimed at automating teaching processes. In: *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences*. 2021. P. 1538. URL: <http://hdl.handle.net/10125/70798>
16. Sherman M., et al. Impact of auto-grading on an introductory computing course. *J. Comput. Sci. Coll.* 2013;28(6):69–75.
17. Rivers K., Koedinger K.R. Data-driven hint generation in vast solution spaces: a self-improving python programming tutor. *Int. J. Artif. Intell. Educ.* 2017;27(1):37–64. <https://doi.org/10.1007/s40593-015-0070-z>
18. Sovietov P. Automatic generation of programming exercises. In: *2021 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE)*. IEEE. 2021. P. 111–114. <https://doi.org/10.1109/TELE52840.2021.9482762>
19. Schleimer S., Wilkerson D.S., Aiken A. Winnowing: local algorithms for document fingerprinting. In: *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'03)*. 2003. P. 76–85. <https://doi.org/10.1145/872757.872770>
20. Rogers M., et al. Exploring personalization of gamification in an introductory programming course. In: *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE'21)*. 2021. P. 1121–1127. <https://doi.org/10.1145/3408877.3432402>
21. Putnam V., Conati C. Exploring the need for explainable artificial intelligence (XAI) in intelligent tutoring systems (ITS). *IUI Workshops*. 2019. V. 19. URL: <https://explainablesystems.comp.nus.edu.sg/2019/wp-content/uploads/2019/02/IUI19WS-ExSS2019-19.pdf>
22. Щербина О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях. *Интеллектуальные системы*. 2011;15(1–4):53–170.
10. Vorob'eva N.A., Oboeva S.V., Bernadiner M.I. Using pedagogical design technologies in the context of digitalization of education. *Vestnik Moskovskogo gorodskogo pedagogicheskogo universiteta. Seriya: Informatika i informatizatsiya obrazovaniya = The academic Journal of Moscow City University, series Informatics and Informatization of Education*. 2020;1(51):34–37 (in Russ).
11. Guo P.J., Kim J., Rubin R. How video production affects student engagement: An empirical study of MOOC videos. In: *Proceedings of the First ACM Conference on Learning @ Scale Conference*. 2014. P. 41–50. <https://doi.org/10.1145/2556325.2566239>
12. Lau S., Guo P.J. Data Theater: A live programming environment for prototyping data-driven explorable explanations. *Workshop on Live Programming (LIVE)*. 2020. 6 p. Available from URL: https://www.samlau.me/pubs/Data-Theater-prototyping-explorable-explanations_LIVE-2020.pdf
13. Guo P.J. Online python tutor: embeddable web-based program visualization for cs education. In: *Proceeding of the 44th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*. 2013. P. 579–584. <https://doi.org/10.1145/2445196.2445368>
14. Miller H., Willcox K., Huang L. Crosslinks: Improving course connectivity using online open educational resources. *The Bridge*. 2016;43(3):38–45. Available from URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/117022>
15. Utterberg M.M., et al. Intelligent tutoring systems: Why teachers abandoned a technology aimed at automating teaching processes. In: *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences*. 2021. P. 1538. Available from URL: <http://hdl.handle.net/10125/70798>
16. Sherman M., et al. Impact of auto-grading on an introductory computing course. *J. Comput. Sci. Coll.* 2013;28(6):69–75.
17. Rivers K., Koedinger K.R. Data-driven hint generation in vast solution spaces: a self-improving python programming tutor. *Int. J. Artif. Intell. Educ.* 2017;27(1):37–64. <https://doi.org/10.1007/s40593-015-0070-z>
18. Sovietov P. Automatic generation of programming exercises. In: *2021 1st International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE)*. IEEE. 2021. P. 111–114. <https://doi.org/10.1109/TELE52840.2021.9482762>
19. Schleimer S., Wilkerson D.S., Aiken A. Winnowing: local algorithms for document fingerprinting. In: *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'03)*. 2003. P. 76–85. <https://doi.org/10.1145/872757.872770>
20. Rogers M., et al. Exploring personalization of gamification in an Introductory programming course. In: *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE'21)*. 2021. P. 1121–1127. <https://doi.org/10.1145/3408877.3432402>
21. Putnam V., Conati C. Exploring the need for explainable artificial intelligence (XAI) in intelligent tutoring systems (ITS). *IUI Workshops*. 2019. V. 19. Available from URL: <https://explainablesystems.comp.nus.edu.sg/2019/wp-content/uploads/2019/02/IUI19WS-ExSS2019-19.pdf>

23. Wang J., Chen B., Wei L., Liu Y. Skyfire: Data-driven seed generation for fuzzing. In: *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. IEEE. 2017. P. 579–594. <https://doi.org/10.1109/SP.2017.23>
24. Papadakis M., et al. Mutation testing advances: an analysis and survey. *Adv. Comput.* 2019;112:275–378. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.015>
25. Hutton G., Meijer E. *Monadic Parser Combinators*. Technical Report NOTTCS-TR-96-4. Department of Computer Science, University of Nottingham. 1996. 38 p. URL: <https://www.cs.nott.ac.uk/~pszgmh/monparsing.pdf>
26. Phothilimthana P.M., Sridhara S. High-coverage hint generation for massive courses: Do automated hints help CS1 students? In: *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE'17)*. 2017. P. 182–187. <https://doi.org/10.1145/3059009.3059058>
22. Shcherbina O.A. Constraint satisfaction and constraint programming. *Intellektual'nye sistemy = Intelligent Systems*. 2011;15(1–4):53–170 (in Russ.).
23. Wang J., Chen B., Wei L., Liu Y. Skyfire: Data-driven seed generation for fuzzing. In: *2017 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. IEEE. 2017. P. 579–594. <https://doi.org/10.1109/SP.2017.23>
24. Papadakis M., et al. Mutation testing advances: an analysis and survey. *Adv. Comput.* 2019;112:275–378. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.015>
25. Hutton G., Meijer E. *Monadic Parser Combinators*. Technical Report NOTTCS-TR-96-4. Department of Computer Science, University of Nottingham. 1996. 38 p. Available from URL: <https://www.cs.nott.ac.uk/~pszgmh/monparsing.pdf>
26. Phothilimthana P.M., Sridhara S. High-coverage hint generation for massive courses: Do automated hints help CS1 students? In: *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE'17)*. 2017. P. 182–187. <https://doi.org/10.1145/3059009.3059058>

Об авторах

Андрианова Елена Гельевна, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: andrianova@mirea.ru. Scopus Author ID 57200555430, ResearcherID T-7908-2018, SPIN-код РИНЦ 9858-3229, <http://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

Демидова Лилия Анатольевна, д.т.н., профессор, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: demidova@mirea.ru. Scopus Author ID 56406258800, ResearcherID R-6077-2016, SPIN-код РИНЦ 9447-3568, <http://orcid.org/0000-0003-4516-3746>

Советов Петр Николаевич, к.т.н., доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sovetov@mirea.ru. Scopus Author ID 57221375427, SPIN-код РИНЦ 9999-1460, <http://orcid.org/0000-0002-1039-2429>

About the authors

Elena G. Andrianova, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Head of the Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: andrianova@mirea.ru. Scopus Author ID 57200555430, ResearcherID T-7908-2018, SPIN-code RSCI 9858-3229, <http://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

Liliya A. Demidova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: demidova@mirea.ru. Scopus Author ID 56406258800, ResearcherID R-6077-2016, SPIN-code RSCI 9447-3568, <http://orcid.org/0000-0003-4516-3746>

Petr N. Sovetov, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sovetov@mirea.ru. Scopus Author ID 57221375427, SPIN-code RSCI 9999-1460, <http://orcid.org/0000-0002-1039-2429>

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
Information systems. Computer sciences. Issues of information security

УДК 004.2
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем

И.Е. Тарасов[@], Д.С. Потехин, О.В. Платонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: tarasov_j@mirea.ru

Резюме

Цели. Развитие элементной базы программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) качественно меняет требования к маршруту проектирования электронных средств вследствие роста логической емкости этих микросхем и тенденции к повышению степени интеграции подсистем. Преимущественным направлением применения данной платформы является концепция системы на кристалле (СнК), направленная на совмещение в одном кристалле подсистем приема, обработки и обмена данными, а также на реализацию управляющих, диагностических и других вспомогательных подсистем. Цель работы – разработка методики применения софт-процессоров, т.е. процессоров, создаваемых на базе конфигурируемых логических ресурсов, для реализации функций управления в составе СнК на базе ПЛИС.

Методы. Использованы методы проектирования цифровых систем.

Результаты. Для софт-процессоров рассмотрен унифицированный маршрут проектирования, основанный на выборе архитектурных параметров, качественно соответствующих задачам управления. В частности, такие параметры, как адресность системы команд, количество тактов конвейера, конфигурация арифметико-логического устройства, являются регулируемыми на этапе проектирования, что позволяет проводить оптимизацию софт-процессора в дискретном пространстве параметров. Рассмотрен также подход к быстрому прототипированию ассемблера на основе стекового языка программирования с регулярной грамматикой. Перспективным направлением применения софт-процессоров является управление аппаратными компонентами цифровой обработки сигналов в составе СнК. В статье рассмотрен пример реализации СнК на базе ПЛИС Xilinx Virtex-7, в составе которого применены несколько процессорных ядер, разработанных по предложенной методике.

Выводы. Рассмотренные подходы к проектированию софт-процессоров позволяют проводить быстрое прототипирование управляющего процессорного ядра для работы в составе СнК на базе ПЛИС.

Ключевые слова: процессор, ПЛИС, система на кристалле, цифровая обработка сигналов, компилятор

• Поступила: 10.01.2022 • Доработана: 21.03.2022 • Принята к опубликованию: 22.04.2022

Для цитирования: Тарасов И.Е., Потехин Д.С., Платонова О.В. Перспективы применения софт-процессоров в системах на кристалле на базе программируемых логических интегральных схем. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):24–33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Prospects for using soft processors in systems-on-a-chip based on field-programmable gate arrays

Ilya E. Tarasov[®], Dmitry S. Potekhin, Olga V. Platonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: tarasov_j@mirea.ru

Abstract

Objectives. Developing the element base of field-programmable gate arrays (FPGA) may significantly affect the design of electronic devices due to the enhanced logical capacity of such chips and the general tendency towards increased subsystem integration. The system-on-a-chip (SoC) concept is aimed at combining receiving, processing, and exchange subsystems onto a single chip, as well as at implementing control, diagnostic, and other auxiliary subsystems. The study aimed at developing a method for soft processor applications, i.e., processors based on configurable logical resources, for implementing control functions in an FPGA-based SoC.

Methods. A digital system design methodology was used.

Results. For soft processors, a unified design route based on selecting architectural parameters qualitatively corresponding to control tasks was considered. In particular, such parameters as instruction set addressness, number of pipeline cycles, and arithmetic logic unit configuration are adjustable at the design stage to allow the optimization of the soft processor in the discrete parameter space. An approach to rapid prototyping of the assembler based on stack-oriented programming language with regular grammar was also considered. The control of digital signal processing hardware as part of an SoC is the promising application area for soft processors. An implementation is considered on the example of an SoC based on Xilinx Virtex-7 FPGA containing several processor cores developed using the proposed methodology.

Conclusions. The considered approaches to soft processor design allow the rapid prototyping of the control processor core for operation as part of an FPGA-based SoC.

Keywords: processor, field-programmable gate array, system-on-a-chip, digital signal processing, compiler

• Submitted: 10.01.2022 • Revised: 21.03.2022 • Accepted: 22.04.2022

For citation: Tarasov I.E., Potekhin D.S., Platonova O.V. Prospects for using soft processors in systems-on-a-chip based on field-programmable gate arrays. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):24–33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-24-33>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В проектах цифровых систем на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) важную роль играет комбинирование аппаратных архитектур для компенсации недостатков матрицы программируемых ячеек. Разработчикам устройств на базе ПЛИС хорошо известно, что по сравнению со специализированной элементной базой матрица конфигурируемых логических ячеек имеет худшие характеристики тактовой частоты, площади кристалла и энергопотребления. Это компенсируется возможностью неограниченного реконfigurирования схемы и создания устройства с архитектурой,

оптимизированной для конкретной задачи [1]. Однако для ряда цифровых узлов и подсистем функциональность является ожидаемой и хорошо известной, поэтому в ходе эволюции ПЛИС их аппаратная архитектура претерпевала изменения, которые сводились к постепенному добавлению специализированных аппаратных компонентов, не подлежащих реконfigurированию, однако встраиваемых в проект, состоящий из логических ячеек. Например, в исходной архитектуре FPGA (field-programmable gate array) на рубеже 2000-х гг. к матрице логических ячеек были добавлены блоки статической двупортовой памяти и аппаратные умножители независимых операндов, позже преобразованные в модули

цифровой обработки сигналов [2]. В дальнейшем, с учетом широкого распространения процессорных систем, в ПЛИС были добавлены аппаратные ядра процессоров PowerPC (Xilinx Virtex-II Pro, Virtex-4, Virtex-5)¹ и Advanced RISC Machine (ARM) (Xilinx Zynq-7000, Xilinx Zynq UltraScale+, Xilinx Versal², Intel Cyclone V³). Выделение подсистемы процессоров ARM в независимо работающую часть кристалла позволило компании Xilinx заявить о классификации семейства Zynq-7000 не как о FPGA, а как о полностью программируемой системе на кристалле (СнК, англ. system-on-a-chip, SoC)⁴.

Практическое применение полностью программируемой СнК показало, что процессоры играют в них преимущественно вспомогательную роль. Это объясняется существенным отставанием их производительности от суммарной производительности матрицы конфигурируемых логических элементов, дополненных компонентами цифровой обработки сигналов. Попытка построения системы вокруг процессорного ядра с настраиваемыми периферийными компонентами приводит к экономически неэффективному решению, поскольку аналогичные возможности обеспечиваются широким спектром элементной базы микроконтроллеров на базе ядер ARM, MIPS (microprocessor without interlocked pipeline stages), RISC-V (reduced instruction set computer) и др. Ключевым фактором, обуславливающим конкурентоспособные технико-экономические показатели ПЛИС, является востребованность реконфигулируемых ресурсов в качестве основного вычислительно-го элемента системы.

Важными направлениями для применения высокопроизводительных вычислительных комплексов являются системы обработки видео, виртуальная и

дополненная реальность, робототехника, промышленная автоматика, цифровая радиосвязь, измерительная техника и ряд других [3, 4]. Среди реализуемых направлений обработки сигналов можно выделить цифровую фильтрацию [5], спектральный анализ [6], алгоритмы машинного обучения [7], в т.ч. на базе специализированных нейропроцессоров [8] или реконфигурируемых ускорителей на базе ПЛИС⁵.

АРХИТЕКТУРА ЦИФРОВОЙ СнК НА БАЗЕ ПРОЦЕССОРА

Требования к процессору в составе СнК определяются его задачами и ролью в системе. Основная вычислительная нагрузка обеспечивается аппаратными ускорителями, реализуемыми на базе логических ячеек, блоков статической памяти и аппаратных модулей цифровой обработки сигналов. Большое количество таких устройств делает практически невозможным постоянное участие процессора (или даже нескольких процессорных ядер) в потоковой обработке данных. Поэтому реализуемые в ПЛИС аппаратные ускорители должны обеспечивать потоковую обработку данных, не требующую постоянного участия процессора, однако допускающую программное управление с целью изменения параметров обработки, реконфигурирования, мониторинга и подобных задач. Также важным является реализация сложных программных протоколов обмена данными, например, поддержка проводных и беспроводных сетей, интерфейса пользователя и др. Структурная схема, иллюстрирующая взаимодействие процессора и подсистемы аппаратного ускорения, приведена на рис. 1.

На рис. 1 видно, что основная производительность вычислений определяется аппаратным ускорителем, реализуемым на базе реконфигурируемых ресурсов ПЛИС. При этом управление низкоскоростными периферийными устройствами также может быть возложено на софт-процессор, причем его небольшой объем позволяет использовать второе (а при необходимости третье, четвертое и т.д.) ядро процессора для упрощения разработки программного обеспечения. Немаловажным фактором является уменьшение времени реакции на события, генерируемые периферийными контроллерами.

¹ Virtex-4 FPGA. User Guide. UG070 (v2.6). December 1, 2008. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug070.pdf, дата обращения 27.12.2021. [Virtex-4 FPGA. User Guide. UG070 (v2.6). December 1, 2008. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug070.pdf. Accessed December 27, 2021.]

² Versal ACAP Technical Reference Manual. AM011 (v1.3). October 27, 2021. URL: <https://www.xilinx.com/support/documentation/architecture-manuals/am011-versal-acap-trm.pdf>, дата обращения 27.12.2021. [Versal ACAP Technical Reference Manual. AM011 (v1.3). October 27, 2021. URL: <https://www.xilinx.com/support/documentation/architecture-manuals/am011-versal-acap-trm.pdf>. Accessed December 27, 2021.]

³ Cyclone® V FPGA и SoC FPGA. URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/details/fpga/cyclone/v.html>, дата обращения 27.12.2021. [Cyclone® V FPGA и SoC FPGA. URL: <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/details/fpga/cyclone/v.html>. Accessed December 27, 2021 (in Russ.).]

⁴ Xilinx Adaptive SoCs. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc.html>, дата обращения 27.12.2021. [Xilinx Adaptive SoCs. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc.html>. Accessed December 27, 2021.]

⁵ Versal Architecture and Product Data Sheet: Overview DS950 (v1.0). October 2, 2018. Advance Product Specification. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds950-versal-overview.pdf, дата обращения 27.12.2021. [Versal Architecture and Product Data Sheet: Overview DS950 (v1.0). October 2, 2018. Advance Product Specification. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds950-versal-overview.pdf. Accessed December 27, 2021.]

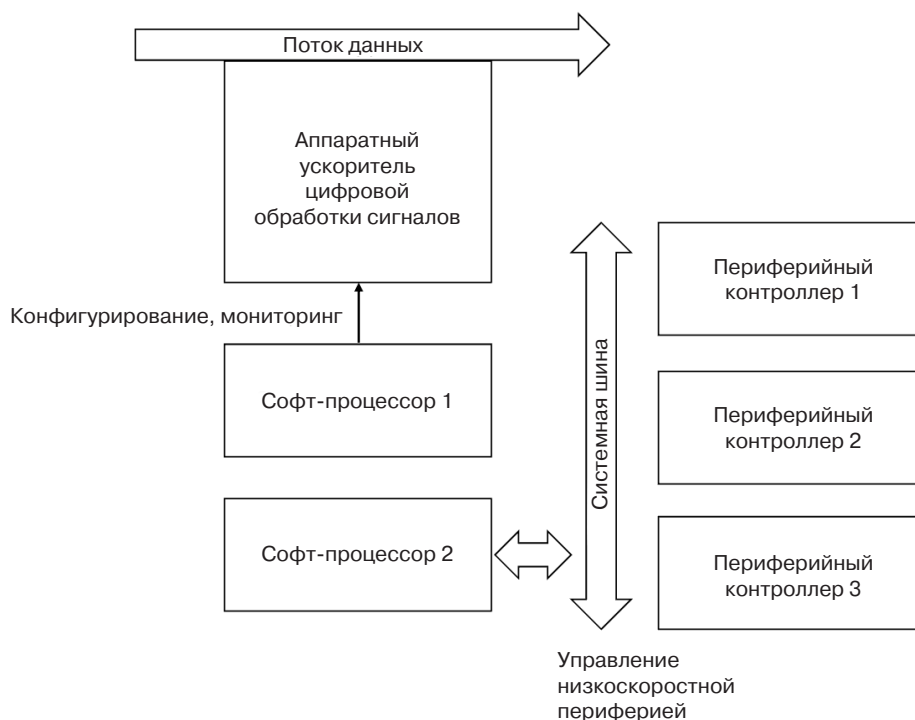


Рис. 1. Взаимодействие процессора и подсистемы аппаратного ускорения вычислений в устройстве класса СнК

При разработке управляющих процессоров возникают две важные задачи:

- обеспечение эффективной топологической реализации;
- инструментальная поддержка со стороны средств разработки программного обеспечения.

Маршрут проектирования цифрового устройства на базе ПЛИС разбит на крупные этапы синтеза (synthesis) и топологической реализации (implementation). Основная часть схемотехнического проектирования происходит на этапе синтеза, в результате которого исходные тексты проекта преобразуются в независимый от аппаратной платформы список связей (netlist). Последующий этап размещения компонентов и трассировки конфигурируемых соединений может заметно снизить прогнозируемую тактовую частоту. Достижение высокой тактовой частоты обычно сопряжено с дополнительными усилиями разработчиков по уточнению взаимного расположения подсистем процессора и даже его отдельных цифровых узлов. Поэтому вновь разрабатываемые процессоры, даже при условии реализации дополнительных возможностей, изначально находятся в невыгодных условиях по сравнению с широко распространенными процессорными ядрами, для которых была реализована оптимизация на уровне топологии ПЛИС.

Требование инструментальной поддержки является вторым важным фактором, тормозящим активное распространение подхода использования новых

софт-процессоров, оптимизируемых для совместной работы с аппаратными ускорителями. Ориентация на распространенные перенацеливаемые (retargetable) компиляторы, такие как GCC (GNU compiler collection) и LLVM (low level virtual machine), по сути, обуславливает и базовую программную модель процессора, поскольку дополнительные команды, вводимые в процессор, не получают автоматическую поддержку универсальных компиляторов. Это резко снижает ценность аппаратных модификаций, поскольку их эффективное использование становится возможным при условии использования низкоуровневого программирования.

АРХИТЕКТУРЫ СОФТ-ПРОЦЕССОРОВ

Реконфигурируемый характер матрицы программируемых ячеек определяет достаточно широкие возможности реализации софт-процессоров. С другой стороны, следует различать применение ПЛИС для макетирования процессора, предназначенного для последующей реализации в СБИС, и разработку компонента СнК, предназначенного для выполнения преимущественно функций управления, мониторинга и поддержки интерфейсов. В этом случае добавляемый в систему софт-процессор не должен перегружать ее по объему занимаемых логических ресурсов или неоправданно снижать тактовую частоту проекта из-за чрезмерной сложности трассировки.

При выборе архитектуры софт-процессора наблюдается сильное влияние архитектур аппаратно реализованных устройств. Например, такие решения, как ARM⁶, MIPS⁷, RISC-V⁸ широко представлены в проектах, однако необходимо обратить внимание, что реализация таких процессоров на базе конфигурируемых логических ячеек FPGA заведомо менее эффективна по сравнению с аппаратным решением. В то же время на широко распространенный софт-процессор MicroBlaze оказала сильное влияние архитектура аппаратного ядра PowerPC, а позже – ARM. Одной из важных причин этого является то, что в период присутствия на рынке соответствующих аппаратных решений важным преимуществом софт-процессора была программная совместимость с ними. Поэтому для ранних семейств ПЛИС с аппаратными ядрами PowerPC ядра MicroBlaze рассматривались как менее производительная альтернатива, пригодная к применению в недорогих ПЛИС, однако позволяющая частично перенести методические наработки и программный код для PowerPC.

Таким образом, реализация на базе логических ячеек широко распространенных процессорных архитектур имеет целью сохранение инструментального и методического обеспечения, однако не в полной мере отвечает требованиям адаптации софт-процессора к системной архитектуре проекта. Возможным решением могла бы стать реализация архитектуры, в большей степени приспособленной к особенностям ПЛИС FPGA, а также к специфике решаемых задач.

Можно отметить, что для софт-процессоров важным параметром является плотность машинного кода. Это обусловлено относительно невысоким удельным весом статической памяти на кристалле ПЛИС. Кроме того, блоки статической памяти могут быть использованы и аппаратными ускорителями, поэтому экономия памяти для хранения программ является важной при выборе архитектуры процессора.

Общий подход к кодированию команд предполагает два фундаментальных направления – сильное и слабое кодирование [9]. При сильном кодировании связь между двоичным представлением команды и ее действием неочевидна, и машинный код требует преобразования. При слабом кодировании отдельные поля двоичного представления напрямую отвечают

за те или иные устройства процессора, кодируя операцию, операнды и дополнительные признаки.

Обобщенный формат команды можно представить следующим образом:

$$\langle \text{Dest} \rangle = \langle \text{Operand1} \rangle \text{ op } \langle \text{Operand2} \rangle,$$

где dest – устройство (регистр) назначения для помещения результата операции;

Operand1 – первый операнд; op – тип операции; Operand2 – второй операнд.

Для системы команд используется понятие адресности, отражающее количество регистров, описываемых в коде команды. На рис. 2 показано представление команды с различной адресностью.

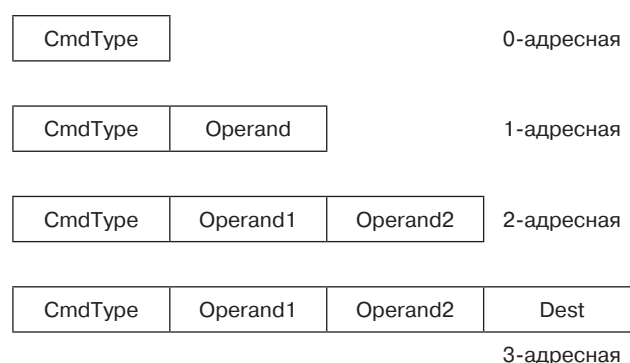


Рис. 2. Представление команд с различной адресностью

На рис. 2 можно видеть, что увеличение адресности в целом увеличивает возможности инструментального программного обеспечения, однако также увеличивает и разрядность командного слова. Следовательно, увеличивается и объем памяти, требуемой для хранения программы. При этом отсутствие указания на тот или иной тип ресурса означает, что он неявным образом следует из типа выполняемой операции или совпадает с указанными ресурсами. Например, в системе команд процессоров x86 регистр назначения совпадает с первым операндом, в аккумуляторных архитектурах регистром назначения и первым операндом всегда является аккумулятор. В стековой архитектуре операнды всегда расположены на вершине стека данных, и туда же помещается результат.

Архитектура системы команд дополняется аппаратной микроархитектурой, определяющей взаимодействие основных схемотехнических узлов, образующих ядро процессора. В целом, архитектура системы команд и микроархитектура проектируются независимо, однако наличие аппаратных компонентов и связи между ними во многом определяют перечень допустимых операций. На рис. 3 показаны основные варианты микроархитектуры процессора, ограниченные 5-тактной архитектурой.

⁶ URL: <https://www.arm.com/products/silicon-ip-cpu>, дата обращения 27.12.2021. [URL: <https://www.arm.com/products/silicon-ip-cpu>. Accessed December 27, 2021.]

⁷ URL: <https://www.mips.com/products/architectures>, дата обращения 27.12.2021. [URL: <https://www.mips.com/products/architectures>. Accessed December 27, 2021.]

⁸ URL: <https://riscv.org/risc-v-foundation/16>, дата обращения 27.12.2021. [URL: <https://riscv.org/risc-v-foundation/16>. Accessed December 27, 2021.]

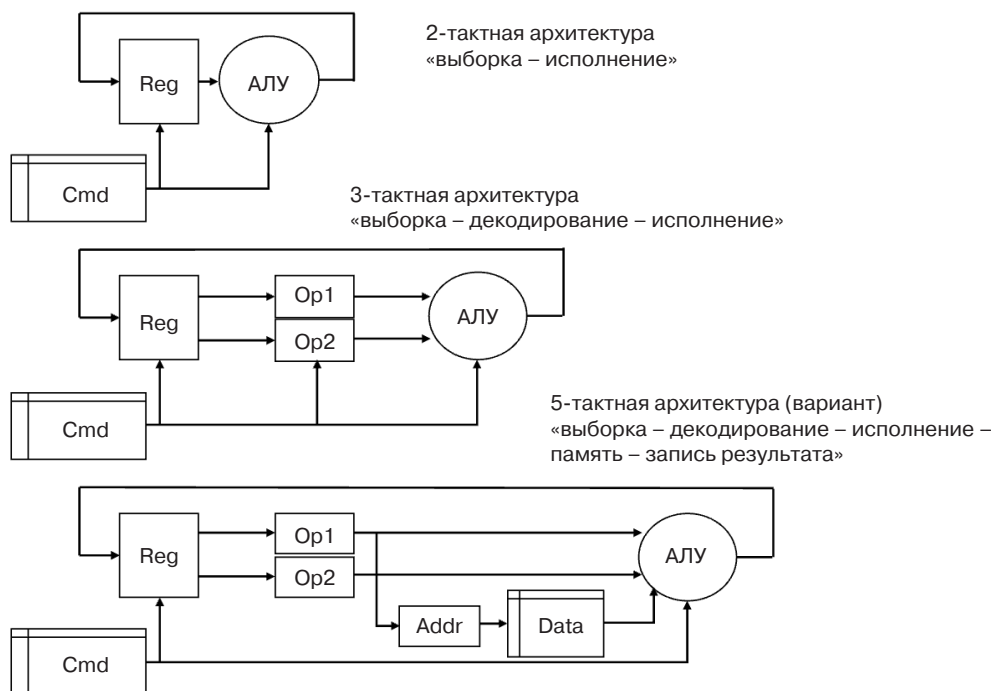


Рис. 3. Основные варианты микроархитектуры процессора. АЛУ – арифметико-логическое устройство

Увеличение количества стадий конвейера позволяет повышать тактовую частоту, а также делает возможной поддержку ряда форматов команд. Например, в 3-тактной архитектуре возможна только одна операция с памятью данных (чтение или запись). При этом синхронный интерфейс памяти данных обуславливает то, что результат чтения будет доступен только на стадии «исполнение», и потребуется еще один такт для записи прочитанных данных в регистр назначения. От этого ограничения свободна 5-тактная архитектура.

Дальнейшее увеличение числа тактов конвейера представляется нецелесообразным для софт-процессоров. Введение конвейеризации в арифметико-логическое устройство (АЛУ) позволяет уменьшить длину критического пути в этом модуле, однако для ПЛИС, где реализация вычислений производится на базе логических ячеек, такой подход менее эффективен из-за более крупной granularity ячеек по сравнению с отдельными вентилями СБИС.

С учетом реконфигурируемого характера ПЛИС и возможности построения системы команд, оптимизированной для подкласса задач, следует обратить внимание на возможности описания АЛУ. Например, в [10] рассмотрено унифицированное описание вычислительного узла четверкой параметров (I , O , D , S), где

I – количество инструкций, выполняемых за один такт;

O – количество операций, определяемое инструкцией;

D – количество операндов (пар операндов), относящихся к операциям;

S – степень конвейеризации.

Для SIMD-архитектур (англ. single instruction, multiple data — одиночный поток команд, множественный поток данных) $D > 1$, а для MIMD (англ. multiple instruction, multiple data – множественный поток команд, множественный поток данных) также $I > 1$, $D > 1$. Для массового параллелизма можно дополнительно рассматривать параллелизм трактов обработки данных (datapath) на уровне отдельного вычислительного узла, что позволяет применить архитектурное описание узла в виде четверки (R , $\langle O \rangle$, $\langle D \rangle$, $\langle S \rangle$), где:

R – количество независимо вычисляемых результатов;

$\langle O \rangle$ – вектор количества операций, выполняемых инструкцией для каждого из трактов данных;

$\langle D \rangle$ – вектор количества операндов (пар операндов) для каждого из трактов данных;

$\langle S \rangle$ – вектор конвейеризации для каждого из трактов данных.

Данный подход подразумевает замену параметров O , D , S на векторы, описывающие характеристики соответствующих путей обработки данных, которые образуют R выходов.

На рис. 4 показаны примеры реализации АЛУ. Такое описание не рассматривает возможные вариации состава вычислительных узлов, показанных как АЛУ1, АЛУ2, АЛУ3, хотя их функциональные возможности могут отличаться как внутри одного тракта, так и для отдельных трактов.

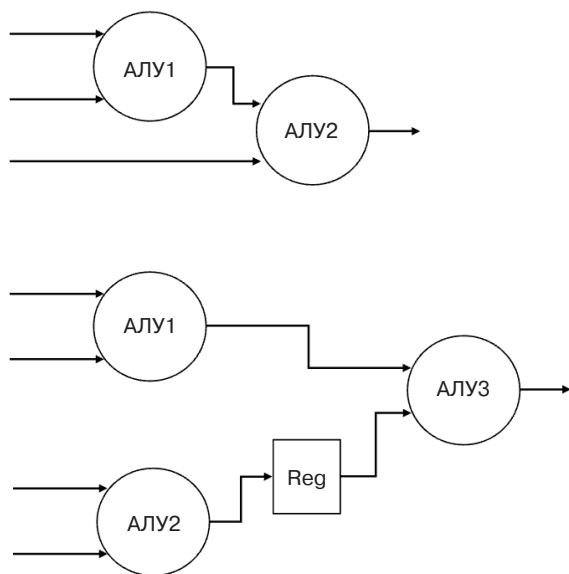


Рис. 4. Примеры реализации архитектуры АЛУ на основе унифицированного представления

Предлагаемый маршрут проектирования тракта данных выглядит следующим образом:

- 1) выбор модели архитектуры в пространстве $(R, \langle O \rangle, \langle D \rangle, \langle S \rangle)$;
- 2) компиляция псевдокода по набору модельных задач, выявление наиболее часто встречаемых последовательностей операций и создание вычислительных узлов для их однократного исполнения, проверка результата с помощью эмулятора и создание узлов процессорного элемента на уровне регистровых передач (register transfer level, т.е. RTL-описания);
- 3) проверка синтезируемости полученной схемы и выполнение функциональной верификации на системном уровне;
- 4) выполнение оценки топологической реализации в выбранном технологическом базисе.

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ В ПРОЕКТАХ НА БАЗЕ ПЛИС

Разработка компиляторов для новых процессорных архитектур является важной составляющей в обеспечении инструментальных средств проектирования систем на их базе. В [11, 12] активно освещается тематика построения компиляторов, которая представляет собой обширную область. В этой связи представляет интерес т.н. регулярная грамматика, которая накладывает существенные ограничения на используемый входной язык, однако имеет небольшую сложность реализации. Регулярную грамматику удобно поддерживать с помощью стековой вычислительной модели.

Стековый процессор представляет собой пример 0-адресной архитектуры, которая способствует сокращению объема программы. Это свойство полезно для

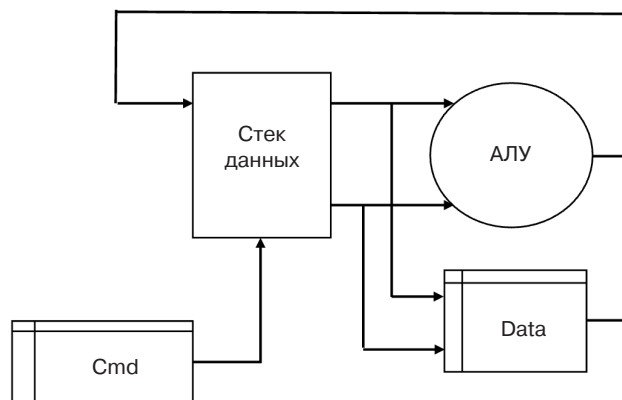


Рис. 5. Микроархитектура стекового процессора

систем на базе ПЛИС, в которых объем накристалльной статической памяти ограничен. Микроархитектура стекового процессора показана на рис. 5.

Для стековой вычислительной модели существуют формализованные подходы к генерации программного кода, в частности, использованные еще в 1970-х гг. в стековом языке программирования Forth [13] и реализованные, например, в виртуальных машинах Java Virtual Machine (JVM), промежуточном представлении кода технологии .net и ряде других. В настоящее время сам по себе язык Forth используется крайне ограниченно, но заложенные в него принципы стековых вычислений позволяют использовать подобный подход для организации низкоуровневого программирования стековых процессорных ядер, которые ввиду компактного кода и относительно небольших аппаратных затрат могут эффективно использоваться в качестве вспомогательных процессоров в составе СнК. Стековая вычислительная модель в сочетании с регулярной грамматикой позволяют проводить быстрое прототипирование инструментального программного обеспечения. Это актуально для обеспечения возможности быстрого перестроения АЛУ и модификации системы команд.

На рис. 6 показан внешний вид разработанного 16-канального анализатора спектра на базе ПЛИС с многопроцессорной управляющей подсистемой на базе стековых процессорных ядер.

В процессе разработки и опытной эксплуатации анализатора спектра были подтверждены характеристики стековых процессорных ядер и их положительное влияние на системные характеристики. В частности, выделение процессорных ядер для решения вспомогательных и коммуникационных задач позволило существенно упростить программирование комплекса, поскольку дополнительные ядра позволили сосредоточиться на основных вычислительных процессах, не выделяя ресурсы основного вычислительного узла для обработки редко возникающих событий. В сочетании с большим объемом используемой ПЛИС (более 500 тыс. логических ячеек) это

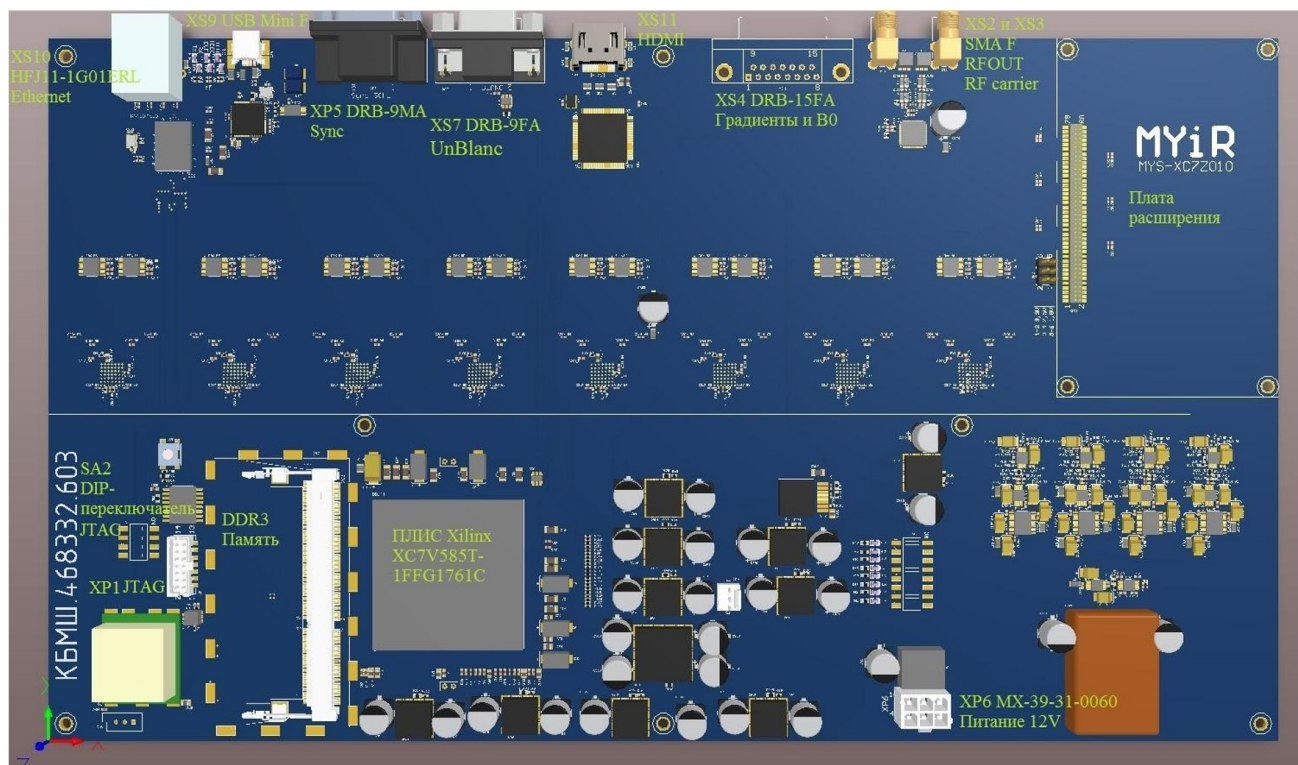


Рис. 6. Внешний вид 16-канального анализатора спектра
на базе ПЛИС с многопроцессорной управляющей подсистемой

подтвердило целесообразность активного применения софт-процессоров для распределения вычислительной нагрузки в сложных вычислительных комплексах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье подходы к применению софт-процессоров направлены на ускорение проектирования систем на базе ПЛИС среднего и большого логического объема. Предложенные способы проектирования позволяют выбирать как варианты микроархитектуры, так и подходы к формированию

системы команд процессора, основным назначением которого становится поддержка основных аппаратных ускорителей и выполнение вспомогательных задач в составе «системы на кристалле». Отдельный интерес представляют стековые софт-процессоры, позволяющие уменьшить размер памяти программ, что актуально для решения вспомогательных задач в условиях дефицита накристалльной памяти ПЛИС.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contributions. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hennessy J.L., Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In: *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. Los Angeles, CA, USA, June 1–6, 2018. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2018.00011>
2. Тарасов И.Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 538 с. ISBN 978-5-9912-0802-4
3. Сесин И.Ю., Болбаков Р.Г. Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>

REFERENCES

1. Hennessy J.L., Patterson D.A. A new golden age for computer architecture: Domain-specific hardware/software co-design, enhanced security, open instruction sets, and agile chip development. In: *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*. Los Angeles, CA, USA, June 1–6, 2018. <https://doi.org/10.1109/ISCA.2018.00011>
2. Tarasov I.E. *PLIS Xilinx. Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya (FPGA Xilinx. Hardware description languages VHDL and Verilog, CAD, design techniques)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2020. 538 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-9912-0802-4
3. Sesin I.Yu., Bolbakov R.G. Comparative analysis of software optimization methods in context of branch predication on GPUs. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>

4. Слепцов В.В., Афонин В.Л., Аблаева А.Е., Динь Б. Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>
5. Смирнов А.В. Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях. *Russ. Technol. J.* 2020;8(6):63–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
6. Умняшкин С.В. *Основы теории цифровой обработки сигналов*. М.: Техносфера; 2017. 528 с. ISBN 978-5-94836-424-7
7. Abadi M., et al. TensorFlow: A system for large-scale machine learning. In: *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16)*. 2016. P. 265–283. URL: <https://www.usenix.org/system/files/conference/osdi16/osdi16-abadi.pdf>
8. Nurvitadhi E., et al. Accelerating Binarized Neural Networks: Comparison of FPGA, CPU, GPU, and ASIC. In: *2016 International Conference on Field-Programmable Technology*. 2016. P. 77–84. <https://doi.org/10.1109/fpt.2016.7929192>
9. Корнеев В., Киселев А. *Современные микропроцессоры*. СПб.: БХВ-Петербург; 2003. 448 с.
10. Sima D., Fountain T., Kacsuk P. *Advanced Computer Architectures: A Design Space Approach*. Addison-Wesley; 1997. 790 p.
11. Ахо А.В., Лам М.С., Сети Р., Ульман Д.Д. *Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий*: пер. с англ. М.: «И.Д. Вильямс»; 2017. 1184 с. ISBN 978-5-8459-1932-8.
12. Пратт Т., Зелковиц М. *Языки программирования: разработка и реализация*: под ред. А. Матросова. СПб.: Питер; 2002. 688 с. ISBN 5-318-00189-0
13. Баранов С.Н., Ноздрунов Н.Р. *Язык Форт и его реализации*. Л.: Машиностроение; 1988. 157 с. ISBN 5-217-00324-3
14. Советов П.Н. Синтез линейных программ для стековой машины. *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*. 2019;3(1):17–22.
15. Тарасов И.Е., Потехин Д.С., Хренов М.А., Советов П.Н. Автоматизация проектирования многопроцессорной системы на базе ПЛИС для управления во встраиваемых приложениях. *Экономика и менеджмент систем управления*. 2017;25(3–1):179–185.
4. Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh B. Development of an information measuring and control system for a quadrocopter. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6): 26–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>
5. Smirnov A.V. Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains. *Russ. Technol. J.* 2020;8(6):63–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>
6. Umnyashkin S.V. *Osnovy teorii tsifrovoy obrabotki signalov (Fundamentals of the theory of digital signal processing)*. Moscow: Tekhnosfera; 2017. 528 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-424-7
7. Abadi M., et al. TensorFlow: A system for large-scale machine learning. In: *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16)*. 2016. P. 265–283. Available from URL: <https://www.usenix.org/system/files/conference/osdi16/osdi16-abadi.pdf>
8. Nurvitadhi E., et al. Accelerating Binarized Neural Networks: Comparison of FPGA, CPU, GPU, and ASIC. In: *2016 International Conference on Field-Programmable Technology*. 2016. P. 77–84. <https://doi.org/10.1109/fpt.2016.7929192>
9. Korneev V., Kiselev A. *Sovremennye mikroprotssessory (Modern microprocessors)*. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2003. 448 p. (in Russ.).
10. Sima D., Fountain T., Kacsuk P. *Advanced Computer Architectures: A Design Space Approach*. Addison-Wesley; 1997. 790 p.
11. Akho A.V., Lam M.S., Seti R., Ul'man D.D. *Kompilyatory: printsipy, tekhnologii i instrumentarii (Compilers: Principles, Techniques, and Tools)*. Transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2017. 1184 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8459-1932-8.
12. Pratt T., Zelkovits M. *Yazyki programmirovaniya: razrabotka i realizatsiya (Programming Languages: Design and Implementation)*. Matrosov A. (Ed.). St. Petersburg: Piter; 2002. 688 p. (in Russ.). ISBN 5-318-00189-0
13. Baranov S.N., Nozdrunov N.R. *Yazyk Fort i ego realizatsii (The Forth Language and its Implementations)*. Leningrad: Mashinostroenie; 1988. 157 p. (in Russ.). ISBN 5-217-00324-3
14. Sovetov P.N. Synthesis of linear programs for a stack machine. *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii = High-performance computing systems and technologies*. 2019;3(1):17–22 (in Russ.).
15. Tarasov I.E., Potekhin D.S., Khrenov M.A., Sovetov P.N. Computer-aided design of multicore system for embedded applications. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2017;25(3–1):179–185 (in Russ.).

Об авторах

Тарасов Илья Евгеньевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tarasov_i@mirea.ru. Scopus Author ID 57213354150, <http://orcid.org/0000-0001-6456-4794>

Потехин Дмитрий Станиславович, д.т.н., доцент, профессор кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: potehin@mirea.ru. Scopus Author ID 57213839310.

Платонова Ольга Владимировна, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: platonova@mirea.ru. Scopus Author ID 57222119478.

About the authors

Ilya E. Tarasov, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: tarasov_i@mirea.ru. Scopus Author ID 57213354150, <http://orcid.org/0000-0001-6456-4794>

Dmitry S. Potekhin, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Professor, Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: potehin@mirea.ru. Scopus Author ID 57213839310.

Olga V. Platonova, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Head of the Computer Technology Department, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: platonova@mirea.ru. Scopus Author ID 57222119478.

УДК 681.2.0821.083:535.2:543.063

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения

А.С. Сигов,
Н.Б. Голованова,
О.А. Минаева[@],
С.И. Аневский,
Р.В. Шамин,
О.И. Останина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Резюме

Цели. Использование синхротронного излучения позволяет решать фундаментальные метрологические задачи воспроизведения и передачи единиц спектрорадиометрии, разрабатывать методы и средства метрологического обеспечения современных технологий, таких как нанофотолитография в электронной промышленности. Развитие твердотельных источников и приемников излучения формирует новые актуальные задачи исследования метрологических характеристик светодиодов, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер и телескопов, успешное решение которых зависит от использования свойств эталонного источника синхротронного излучения. Целью работы является развитие методов спектрорадиометрии для метрологических каналов электронного накопительного кольца при контроле характеристик компонентов в электронной промышленности, при исследованиях и калибровках радиометров, фотометров, излучателей в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Методы. Методы передачи единиц спектрорадиометрии на электронном накопительном кольце основаны на использовании классической теории Ю. Швингера, описывающей электромагнитное излучение релятивистского электрона, для расчета спектральных энергетических характеристик синхротронного излучения с учетом поляризационных компонентов.

Результаты. Рассмотрены возможности развития методов передачи единиц спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения и создания испытательной установки. Эта установка включает в себя компаратор на основе монохроматора, телескопа с ПЗС-матрицей, спектрорадиометра, радиометра, фотометра, гониометра и интегрирующей сферы, позволяющих проводить измерения полного набора спектрорадиометрических и фотометрических характеристик источников и приемников излучения – от наиболее дифференциального распределения спектральной плотности энергетической яркости по излучающей области до интегрального потока излучения с прослеживаемостью к эталонному источнику синхротронного излучения.

Выводы. Определение метрологических характеристик светодиодных излучателей, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер и телескопов с использованием синхротронного излучения представляется наиболее перспективным направлением с учетом малых размеров излучающей области синхротронного излучения, Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного сгустка синхротрона, широкого динамического диапазона перестройки спектра за счет изменения энергии и числа ускоренных электронов.

Ключевые слова: спектрорадиометрия, синхротронное излучение, энергетическая яркость, сила излучения, светодиод, фотометр, радиометр

• Поступила: 15.02.2022 • Доработана: 28.02.2022 • Принята к опубликованию: 18.04.2022

Для цитирования: Сигов А.С., Голованова Н.Б., Минаева О.А., Аневский С.И., Шамин Р.В., Останина О.И. Решение актуальных задач спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation

Alexander S. Sigov,
Nataliya B. Golovanova,
Olga A. Minaeva[@],
Sergei I. Anevsky,
Roman V. Shamin,
Olga I. Ostanina

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Abstract

Objectives. In order to solve fundamental metrological problems concerning the reproduction and transmission of spectral radiometry units, as well as developing methods and tools for metrological support of modern technologies such as nanophotolithography in the electronics industry, synchrotron radiation can be used. When developing solid-state sources and receivers of radiation, new topical problems arise in connection with the metrological characteristics of light-emitting diodes (LEDs), multi-element array receivers, charge-coupled device (CCD) cameras and telescopes, whose successful solution depends on the properties of a reference source of synchrotron radiation. Therefore, the purpose of the present work is to develop spectral radiometry methods for obtaining metrological channels using an electron storage ring in order to control the characteristics of electronics components, as well as for studying and calibrating radiometers, photometers, and emitters operating in the visible, ultraviolet and infrared regions of the electromagnetic spectrum.

Methods. Methods for transmitting spectroradiometric units on an electron storage ring are based on the classical theory of Julian Schwinger, which describes the electromagnetic radiation of a relativistic electron to calculate the spectral and energetic synchrotron radiation characteristics taking polarization components into account.

Results. The possibility of developing methods for transmitting spectral radiometric units using synchrotron radiation was evaluated by means of a test setup, which included a monochromator-based comparator, a telescope with a CCD array, a spectroradiometer, a radiometer, a photometer, a goniometer, and an integrating sphere. This allowed the full set of spectroradiometric and photometric characteristics of radiation sources and receivers to be measured: from the most differential distribution of the spectral radiance density of the emitting region to the integral radiation flux. The results were compared with the reference synchrotron radiation source.

Conclusions. Among possible approaches for determining the metrological characteristics of LED emitters, multi-element array receivers, CCD cameras, and telescopes, synchrotron radiation seems to be the most promising. This

approach allows the small size of the emitting region of synchrotron radiation, the Gaussian distribution of radiance over the emitting region of the synchrotron electron bunch, as well as the wide dynamic range of spectrum tuning due to changes in the energy and number of accelerated electrons, to be taken into account.

Keywords: spectral radiometry, synchrotron radiation, radiance, radiation intensity, LED, photometer, radiometer

• Submitted: 15.02.2022 • Revised: 28.02.2022 • Accepted: 18.04.2022

For citation: Sigov A.S., Golovanova N.B., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Shamin R.V., Ostanina O.I. Solution of topical spectroradiometric problems using synchrotron radiation. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):34–44. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-34-44>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства синхротронного излучения ускоренных релятивистских электронов в циклических ускорителях открыли большие возможности для метрологии, что позволило использовать электронные накопительные кольца (ЭНК) в качестве первичных эталонных источников электромагнитного излучения с чистым, свободным от плазмы, непрерывным спектром, без спектральных линий, легко перестраиваемым за счет изменения энергии и числа электронов на орбите [1].

Синхротронное излучение широко используется как в фундаментальных метрологических исследованиях, так и при разработке основ метрологического обеспечения современных технологий нанополитографии в электронной промышленности [2]. В Указе Президента Российской Федерации¹ и Постановлении Правительства Российской Федерации² уделяется большое внимание развитию спектрорадиометрии оптического излучения с использованием синхротронного излучения.

Первые работы по спектрорадиометрии, проведенные на синхротроне DESY³ в Гамбурге, были

направлены на измерение спектральной плотности энергетической яркости ультрафиолетового излучения с использованием относительного спектрального распределения синхротронного излучения с абсолютной привязкой в видимой области к эталону на модели черного тела. Это позволило обеспечить спектральный диапазон калибровки континуума дейтерия до границы вакуумного ультрафиолета, то есть до энергий фотонов 6 эВ, недоступной для модели черного тела. Использование электронных накопительных колец и синхротронов в России, Германии и США расширяет диапазон абсолютных спектральных измерений в область вакуумного ультрафиолета, сначала в область Шумана до 10 эВ, а затем и в область Лаймана до 30 эВ. Особенно интенсивное развитие метрологии синхротронного излучения началось с освоения экстремального вакуумного ультрафиолета для нанoeлектроники, позволившее с учетом современных достижений в нанополитографии обеспечить при энергиях фотонов около 100 эВ размеры элементов микросхем до единиц нанометров [3, 4]. В то же время в Национальном метрологическом институте РТВ (Берлин) с созданием метрологического накопительного кольца Metrological Light Source (MLS) начались работы по использованию синхротронного излучения также для спектрорадиометрии труднодоступного терагерцового диапазона для энергий фотонов от 10^{-2} до 10^{-3} эВ [5]. Большое внимание развитию методов спектрорадиометрии с использованием синхротронного излучения уделяется в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» на ЭНК Сибирь-1 и Сибирь-2. Работы с синхротронным излучением позволили обеспечить в ведущих национальных метрологических центрах проведение абсолютных спектральных измерений в широком диапазоне длин волн от радиочастот до рентгеновского излучения.

Фундаментальные и прикладные метрологические исследования с использованием синхротронного излучения проводятся в национальных

¹ Указ Президента РФ от 25 июля 2019 г. № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в РФ». [Decree of the President of the Russian Federation of July 25, 2019. No. 356 “On measures to develop synchrotron and neutron research and research infrastructure in the Russian Federation” (in Russ.).]

² Постановление Правительства РФ от 16.03.2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы». [Decree of the Government of the Russian Federation of March 16, 2020. No. 287 “On Approval of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure for 2019–2027” (in Russ.).]

³ Deutsches Elektronen-Synchrotron – немецкий электронный синхротрон. (Национальный исследовательский центр DESY, Германия). [Deutsches Elektronen-Synchrotron – German electronic synchrotron (National Research Center DESY, Germany).]

метрологических центрах не только в труднодоступных областях спектра – экстремальном вакуумном ультрафиолетовом (УФ) и терагерцовом диапазонах, но и в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра, где постоянно формируется большое количество актуальных метрологических задач, успешное решение которых прямо зависит от использования свойств эталонного источника синхротронного излучения. В первую очередь это связано с исследованиями метрологических характеристик светодиодов, многоэлементных матричных приемников, ПЗС-камер⁴ и телескопов.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Главными задачами при исследовании метрологических характеристик светодиодов в соответствии с существующими ГОСТ 8.888-2015⁵, ГОСТ Р 54814-2018⁶, ГОСТ Р 8.749-2011⁷ являются измерения спектральной плотности силы излучения и полного потока излучения. Измерения метрологических характеристик светодиодов особенно важны для проведения технологического контроля при производстве излучателей белого холодного, нейтрального и теплого цветов для разработки светотехнического оборудования наземной, авиационной и морской техники, применяемых в подсветке и индикации бортовой аппаратуры, а также светотехнических изделий офисного, уличного и декоративного освещения. Исследование электрооптических, световых и тепловых характеристик полупроводниковых наногетероструктур твердотельных источников

излучения также требует развития методов спектрорадиометрии. Для определения характеристик излучения источников в единицах спектральной плотности силы излучения (СПСИ) используют спектральные компараторы, обеспечивающие интегрирование спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в пределах излучающей области и фиксированного телесного угла [6].

Основной проблемой спектрорадиометрии синхротронного излучения является необходимость учета сложной угловой зависимости интенсивности поляризационных компонентов [1]. Компаратор для калибровки СПСИ светодиодов включает фокусирующую оптику, спектральный прибор, светофильтры и приемник излучения. Метод передачи единицы СПСИ на электронном накопительном кольце должен учитывать два поляризационных компонента синхротронного излучения, плоскость колебаний которых лежит в плоскости электронной орбиты и в перпендикулярной плоскости. Уравнение, описывающее сигнал компаратора $i_{SR}(\lambda)$, пропорциональный СПСИ [7, 8] в поляризационных компонентах синхротронного излучения, записывается следующим образом:

$$i_{SR}(\lambda) = \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda) \tau^{\parallel}(\psi, \lambda) S^{\parallel}(\lambda) \Delta\lambda \Delta\varphi d\psi + \\ + \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda) \tau^{\perp}(\psi, \lambda) S^{\perp}(\lambda) \Delta\lambda \Delta\varphi d\psi, \quad (1)$$

где Ψ – угол отклонения от плоскости электронной орбиты; Ψ_0 – апертурный угол отклонения от плоскости электронной орбиты; λ – длина волны; $I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda)$, $I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda)$ – спектральная плотность силы синхротронного излучения, поляризованного, соответственно, в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $\tau^{\parallel}(\psi, \lambda)$, $\tau^{\perp}(\psi, \lambda)$ – коэффициенты пропускания спектрального прибора компаратора для излучения, поляризованного в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $S^{\parallel}(\lambda)$, $S^{\perp}(\lambda)$ – спектральная чувствительность детектора компаратора для излучения, поляризованного в плоскости орбиты и в перпендикулярной плоскости; $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение компаратора; $\Delta\varphi$ – апертурный угол компаратора в плоскости электронной орбиты.

Как следует из уравнения (1), использование в составе компаратора монохроматора, фотоумножителя или спектрорадиометра, эффективность которых зависит от плоскости поляризации падающего излучения, затрудняет метрологический анализ. Для исключения сложной зависимости сигнала от степени поляризации используются фотодиод или ПЗС-матрица, а для спектральных измерений – монохроматор нормального падения или комплект интерференционных фильтров [9, 10].

⁴ ПЗС – прибор с зарядовой связью. [CCD is a charge-coupled device.]

⁵ ГОСТ 8.888-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды эталонные некогерентного излучения. Технические требования. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST 8.888-2015. National Standard of the Russian Federation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reference Light-emitting diodes (LED) of noncoherent radiation. Technical requirements. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.).]

⁶ ГОСТ Р 54814-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения. М.: Стандартинформ; 2018. [GOST R 54814-2018. National Standard of the Russian Federation. Light emitting diodes (LED) and LED modules for general lighting and related equipment. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2018 (in Russ.).]

⁷ ГОСТ Р 8.749-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик. М.: Стандартинформ; 2019. [GOST R 8.749-2011. National Standard of the Russian Federation. State system for ensuring the uniformity of measurements. Light-emitting diodes. Methods of photometric measurements. Moscow: Standartinform; 2019 (in Russ.).]

Это позволяет упростить уравнение (1) для сигнала компаратора:

$$i_{SR}(\lambda) = S(\lambda)\Delta\lambda\Delta\varphi\Delta\tau \left[\int_{\Psi_0} I_{SR}^{\parallel}(\psi, \lambda) d\psi + \int_{\Psi_0} I_{SR}^{\perp}(\psi, \lambda) d\psi \right]. \quad (2)$$

Для светодиода уравнение, описывающее в фиксированном телесном угле Ω сигнал компаратора $i_{CD}(\Omega, \lambda)$, пропорциональный спектральной плотности силы неполяризованного излучения $I_{CD}(\Omega, \lambda)$ [11], имеет вид:

$$i_{CD}(\Omega, \lambda) = S(\lambda)\Delta\lambda\Delta\tau\Omega I_{CD}(\Omega, \lambda). \quad (3)$$

На метрологическом канале синхротронного излучения ЭНК BESSY-II⁸ в Берлине для решения проблемы учета поляризационных компонентов в системе уравнений (1) и (3) используется поворот монохроматора вокруг оптической оси без нарушения юстировки. Для компаратора с малым апертурным углом относительно плоскости электронной орбиты учитывается только поляризационный сигма-компонент синхротронного излучения $I_{SR}^{\parallel}$, что позволяет получить в соответствии с формулой Швингера [12] относительно простое решение для спектральной плотности силы излучения светодиода:

$$I_{CD}(\Omega, \lambda) = 0.0273N(i_{CD}/i_{SR})\Delta\varphi(e^2c/\Omega R^3) \times (\lambda_c/\lambda)^4 \gamma^8 \int_{\Psi_0} K_{2/3}^2(\lambda_c/2\lambda) d\psi, \quad (4)$$

где N – число электронов на орбите; γ – релятивистский фактор; e – заряд электрона; R – радиус орбиты электрона; c – скорость света; $K_{2/3}$ – функция Макдональда; $\lambda_c = (4/3)\pi R\gamma^3$ – критическая длина волн.

Для определения энергии электронов и релятивистского фактора на накопительных кольцах используется обратное рассеяние лазерного излучения на электронном пучке, измерение индукции магнитного поля на орбите, а также методы, основанные на относительных спектральных измерениях потока синхротронного излучения. Наиболее точный метод определения числа электронов основан на использовании телескопа с ПЗС-матрицей при выделении

отдельного электрона на орбите ускорителя. Радиус орбиты определяется частотой ускоряющего поля электронных накопительных колец. Для выполнения условия $\Omega = \Delta\varphi\Psi_0$ определяются размеры апертурных диафрагм и расстояние до излучающей точки орбиты.

На длинах волн много больше критической λ_c , то есть в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра, при увеличении апертурного угла оптической системы компаратора в плоскости электронной орбиты Ψ_0 для источника синхротронного излучения интегральные значения СПСИ в полном угле отклонения от плоскости орбиты, нормированные на один электрон, определяются только радиусом орбиты в точке излучения. Это означает, что в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра интеграл спектральной плотности силы синхротронного излучения по всем углам отклонения от плоскости орбиты рассчитывается с высокой точностью, не зависит от энергии электронов и является постоянной для каждого источника синхротронного излучения. Этот вывод особенно важен для метрологических исследований при создании первичных спектро-радиометрических эталонов, основанных на фундаментальных физических константах.

Интегрирование СПСИ светодиодов по длинам волн позволяет определить силу излучения и силу света в фиксированном телесном угле с учетом относительной спектральной световой эффективности в соответствии с ГОСТ 8.332-13⁹. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (МКО) № 127:2007¹⁰ измерение силы излучения в режиме А проводится на расстоянии 316 мм, в телесном угле 0.001 ср и в режиме В – на расстоянии 100 мм в телесном угле 0.01 ср. Для определения силы излучения и силы света светодиодов применяются интегральные компараторы, включающие радиометры, фотометры или спектро-радиометры [13]. При этом основные трудности связаны с необходимостью точных измерений коэффициентов спектральной коррекции чувствительности компаратора в соответствии с рекомендациями МКО № 053-1982¹¹.

⁹ ГОСТ 8.332-2013 Межгосударственный стандарт. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. М.: АО «Кодекс»; 2015. [GOST 8.332-2013. Interstate Standard. State system for ensuring the uniformity of measurements. Light measurements. Values of relative spectral luminous efficiency function of monochromatic radiation for photopic vision. Moscow: Kodeks; 2015 (in Russ.).]

¹⁰ МКО № 127:2007 Технический доклад «Измерения СИД». [CIE 127:2007 Technical report «Measurement of LEDs». ISBN 978-3-901906-58-9.]

¹¹ МКО № 053-1982. Методы определения характеристик радиометров и фотометров. [CIE 053-1982. Methods of characterizing the performance of radiometers and photometers. ISBN 978-92-9034-053-9.]

⁸ BESSY-II Electron storage ring – источник синхротронного излучения третьего поколения (Helmholtz-Zentrum Berlin, Германия). URL: https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/index_en.html, дата обращения 10.12.2021 [BESSY-II Electron storage ring is a third-generation synchrotron radiation source (Helmholtz-Zentrum Berlin, Germany). URL: https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/quellen/bessy/index_en.html. Accessed December 10, 2021.]

Спектральная коррекция чувствительности люксметра в соответствии с нормативными документами проводится только для пяти типов контрольных излучателей. Это означает, что спектральная коррекция чувствительности люксметра проводится в основном в максимуме чувствительности в «зеленой» области, а на спадающих крыльях в «синей» и «красной» областях спектра относительная спектральная чувствительность люксметра может отличаться в десятки раз от относительной спектральной световой эффективности. Это приводит к существенным ошибкам, например, при оценке опасного воздействия излучения в случае применения ярких синих светодиодов [14].

При использовании интегрального радиометра трудности оказываются более значимыми, т.к. относительная спектральная чувствительность радиометра должна иметь П-образную зависимость, которую практически невозможно реализовать. Поэтому создание универсальных интегральных радиометров и фотометров для определения силы излучения и силы света светодиода является сложной метрологической задачей [14]. В соответствии с выражением (4) при использовании ЭНК проводится калибровка радиометров и фотометров, а также определяются коэффициенты спектральной коррекции для конкретных типов излучателей и компараторов. Использование спектрорадиометров, калиброванных по синхротронному излучению, позволяет при интегрировании сигналов, пропорциональных СПСИ светодиодов, получить значения силы излучения и силы света, но при этом необходим учет уровня рассеянного излучения, высших порядков дифракции и влияния степени поляризации синхротронного излучения [16].

При определении суммарной стандартной неопределенности измерений силы излучения и силы света необходимо также учитывать диапазон линейности чувствительности, шумы и порог чувствительности детекторов спектрорадиометра.

Основные трудности при измерении характеристик твердотельных излучателей связаны со сложной угловой зависимостью СПСИ и высокой энергетической яркостью твердотельных светодиодных излучателей [17]. Использование в метрологических лабораториях гониометров для измерений углового распределения интенсивности излучения светодиодов позволяет получить значение потока излучения и светового потока. В качестве детектора гониометра применяются радиометры, фотометры, спектрорадиометры и ПЗС-матрицы, калиброванные по источнику синхротронного излучения.

Для измерения полного потока излучения детектор устанавливается на подвижное плечо гониометра и юстируется в горизонтальной и вертикальной

плоскостях по максимуму сигнала. При пошаговой фиксации сигналов определяется угловое распределение силы излучения или силы света. Для повышения точности измерений используется минимальный шаг угла поворота относительно геометрической оси светодиода. Сигналы радиометра или фотометра в зависимости от угла отклонения от геометрической оси излучателя и при повороте излучателя вокруг геометрической оси нормируются на максимальный сигнал углового распределения, измеренный в телесном угле, фиксированном при калибровке на источнике синхротронного излучения.

Интегрирование угловой зависимости нормированных сигналов гониометра позволяет рассчитать полный поток излучения или световой поток светодиода, но требует обработки большого объема измерительной информации при количестве градаций по углам, составляющем несколько тысяч точек, а также значительного времени измерений при стабилизации режима питания светодиода и поддержании теплового режима. Измерение полного потока излучения с использованием гониометра характеризуется значительной систематической погрешностью. Эта погрешность включает в себя абсолютную калибровку эталонного радиометра или фотометра с учетом спектральной коррекции чувствительности, установку угла поворота плеча гониометра, измерение расстояния от детектора до центра вращения, угловое разрешение и угловой шаг, шум радиометра или фотометра, высокую скорость сканирования по углам рассеянного излучения и нестабильность источника излучения [18].

Использование высокочувствительных многоэлементных детекторов позволяет сократить время измерений при сохранении требований спектральной коррекции чувствительности. Компьютерная 3D-диаграмма, иллюстрирующая результаты измерений угловой зависимости силы излучения светодиода, представлена на рис. 1.

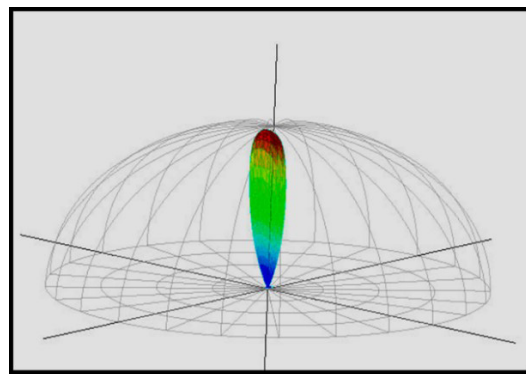


Рис. 1. Компьютерная 3D-диаграмма, иллюстрирующая результаты измерений угловой зависимости силы излучения светодиода

Приведенный пример показывает, что максимум углового распределения силы излучения может быть сдвинут относительно оси светодиода и поток излучения сконцентрирован в малом телесном угле. Полученное угловое распределение позволяет определить силу излучения и поток излучения в произвольном телесном угле.

На рис. 2 приведена соответствующая 2D-диаграмма, где красной линией показана полуширина углового распределения излучения светодиода со сдвигом относительно геометрической оси.

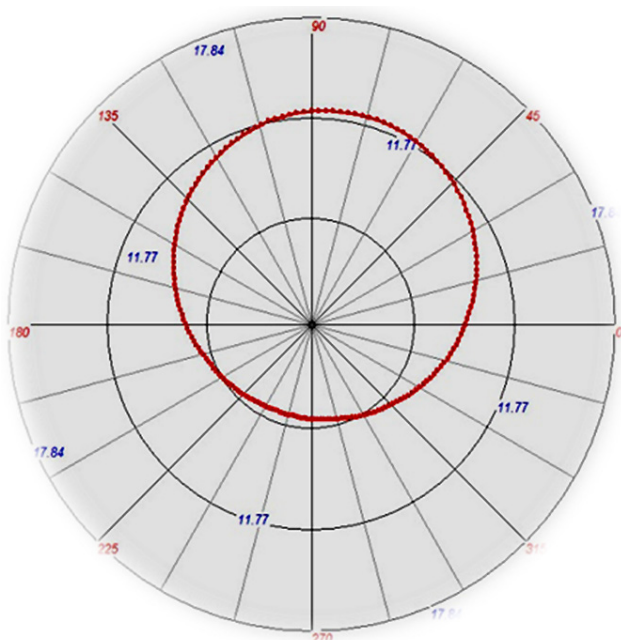


Рис. 2. 2D-диаграмма полуширины углового распределения излучения светодиода

Измерение светового потока мощных светодиодов, используемых для освещения, требует исследования углового распределения силы излучения в режиме, в котором светодиоды применяются в рабочих модулях. Для обеспечения заданной температуры при измерении характеристик мощных светодиодов используется регулируемый теплоотвод.

Особое значение в спектрометрике имеет измерение наиболее дифференциальных характеристик излучения – пространственного распределения яркости и энергетической яркости светодиодов по излучающей области. В состав компаратора энергетической яркости входят оптическая система, комплект корректирующих светофильтров и охлаждаемая ПЗС-матрица.

Использование фундаментального свойства синхротронного излучения – Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного пучка ЭНК – позволяет провести

калибровку относительной чувствительности пикселей ПЗС-матрицы и измерить распределение энергетической яркости различных излучателей.

На рис. 3 представлены результаты регистрации Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области ЭНК, а на рис. 4 – по излучающей области светодиода [19].

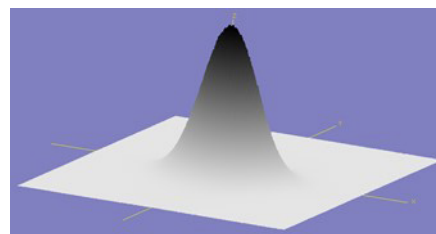


Рис. 3. Результаты регистрации Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области ЭНК

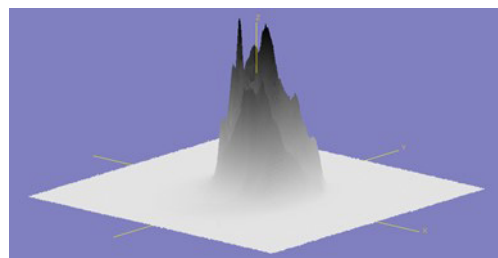


Рис. 4. Результаты регистрации распределения энергетической яркости по излучающей области светодиода

Существенная неоднородность пространственного распределения энергетической яркости светодиода связана с искажением фокусирующей линзой характера распределения [20]. Для исключения искажения распределения яркости по излучающей области разработана конструкция вторичных эталонных светодиодов, представленных на рис. 5, со специально сформированной поверхностью и регулировкой температурного режима с использованием элемента Пельтье.



Рис. 5. Общий вид вторичных эталонных светодиодов

На рис. 6 представлены результаты измерений распределения яркости по излучающей области эталонного светодиода.

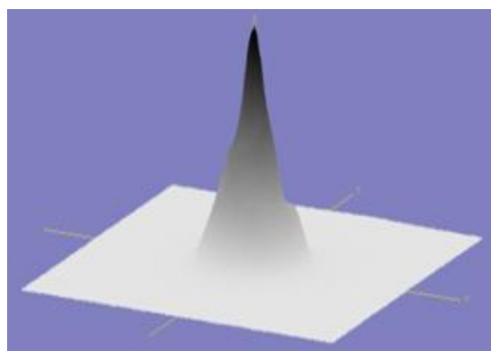


Рис. 6. Результаты измерений распределения яркости по излучающей области эталонного светодиода

Для формирования чувствительности компаратора на основе телескопа с ПЗС-матрицей в соответствии с относительной световой эффективностью используется комплект корректирующих фильтров. Это позволяет проводить измерения пространственного распределения яркости и средней габаритной яркости для определения показателей ослепленности и дискомфорта световой среды, формируемой сверхяркими светодиодными излучателями.

Наиболее распространенный метод измерения полного потока излучения светодиода основан на использовании интегрирующей сферы с коррекцией пространственной неоднородности коэффициента диффузного отражения поверхности сферы с угловой и спектральной коррекцией чувствительности детектора [21]. Для увеличения точности измерений используются интегрирующие сферы большого диаметра с высоким соотношением площади сферы к размеру излучателя. При этом в соответствии с рекомендациями МКО светодиод должен устанавливаться в центре интегрирующей сферы.

Схема калибровки светодиода и общий вид используемой интегрирующей сферы представлены на рис. 7 и 8. В интегрирующую сферу 1 через апертурную диафрагму вводится излучение внешнего эталонного источника 6 или 7 и регистрируется приемником излучения 2. В качестве приемника излучения 2 используется фотодиод или ПЗС-матрица с корректирующими фильтрами, фотометр, радиометр или спектрорадиометр. Излучение калибруемого светодиода 4, установленного в центре интегрирующей сферы, перекрывается экранами 3 от прямого попадания на приемник излучения. Приемник излучения 5 используется для регистрации излучения на апертурной диафрагме интегрирующей сферы. Внешние эталонные источники излучения 6, 7 и приемник излучения 5 расположены под углом 90° .

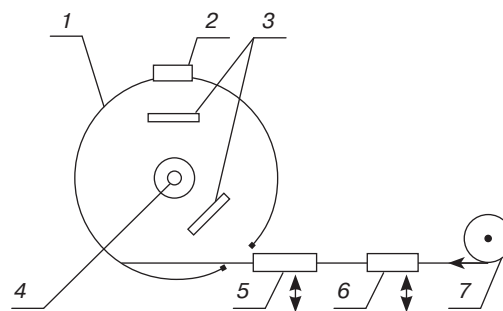


Рис. 7. Схема калибровки светодиода на интегрирующей сфере с использованием синхротронного излучения



Рис. 8. Общий вид интегрирующей сферы

Поток излучения от внешнего эталонного источника определяется интегрированием силы излучения в пределах телесного угла, фиксированного при калибровке по источнику синхротронного излучения. Поток излучения от внутреннего источника – светодиода определяется отношением сигналов приемника излучения от внешнего и внутреннего источников с учетом поправочных коэффициентов, учитывающих неидеальность интегрирующей сферы [22].

В соответствии с рекомендациями МКО при калибровке используются поправочные коэффициенты для учета погрешности спектральной коррекции относительно источника типа А, неоднородности интегрирующей сферы для внутреннего и внешнего источников излучения, отличия коэффициентов диффузного отражения покрытия сферы при различных углах падения. Коэффициент зонной неоднородности чувствительности сферы определяется угловой зависимостью сигналов приемника и позволяет учитывать влияние экранов, неравномерность толщины покрытия, состояние внутренней поверхности [23]. Чувствительность интегрирующей сферы калибруется с опорой на воспроизводимость метрологических характеристик синхротронного

излучения ЭНК и определяется отношением сигнала приемника излучения к потоку излучения на входной диафрагме [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что развитие методов спектрометриии, разработанных для метрологических каналов ЭНК в России и за рубежом, показывает, что источник синхротронного излучения является высокоточным первичным эталоном, который используется национальными метрологическими центрами для решения задач метрологического обеспечения при производстве компонентов в электронной промышленности, исследованиях и калибровках радиометров, фотометров и излучателей, включая светодиоды, в видимых УФ и ИК областях спектра.

Методы спектрометриии, основанные на использовании фундаментальных свойств синхротронного излучения при малой излучающей области и высоких значениях силы излучения и энергетической яркости, регулируемых в широком динамическом диапазоне, позволяют обеспечить абсолютную калибровку ПЗС-телескопов и камер, интегрирующих сфер, гониофотометров и спектрометриров.

Создание спектрометриической установки, включающей компаратор на основе комплекта излучателей, монохроматора, телескопа с ПЗС-матрицей, спектрометра, радиометра и фотометра, позволит проводить измерения полного набора спектрометрических и фотометрических характеристик излучателей, используемых в электронной промышленности, от наиболее дифференциального распределения СПЭЯ по излучающей области до интегрального полного потока излучения.

При использовании источника синхротронного излучения на длинах волн много больше критической, то есть в видимой, ближней УФ и ближней ИК областях спектра, интегральные значения СПСИ в полном угле отклонения от плоскости орбиты, нормированные на число ускоренных электронов, определяются только радиусом орбиты в точке излучения, не зависят от энергии электронов и рассчитываются с высокой точностью по фундаментальным физическим константам и, таким образом, являются неизменными метрологическими характеристиками для каждого источника синхротронного излучения.

Определение метрологических характеристик светодиодов с использованием синхротронного излучения представляется наиболее перспективным с учетом малых размеров излучающей области синхротронного излучения, сравнимых с излучающей областью светодиодов, Гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области электронного сгустка синхротрона, широкого динамического диапазона перестройки СПСИ за счет

изменения энергии и числа ускоренных электронов на длинах волн вблизи критической.

Вклад авторов

А.С. Сигов – выбор актуального направления исследований на основе использования методов и средств метрологического обеспечения современных технологий, таких как нанополитография в электронной промышленности; анализ и оценка полученных результатов.

Н.Б. Голованова – оценка эффективности выбранного метода исследований, участие в выборе оптимального состава экспериментальной установки при исследованиях характеристик компонентов в электронной промышленности, а также при калибровках радиометров, фотометров оптического излучения.

О.А. Минаева – проведение теоретических и экспериментальных исследований, участие в разработке спектрометрической установки для измерений характеристик источников и приемников излучения с прослеживаемостью к эталонному источнику синхротронного излучения, оценка погрешностей результатов измерений.

С.И. Аневский – проведение экспериментальных спектрометрических исследований для решения фундаментальных метрологических задач воспроизведения и передачи единиц спектрометриии с использованием теоретических основ синхротронного излучения.

Р.В. Шамин – проведение теоретических обоснований использования эталонного источника синхротронного излучения для оценки характеристик источников и приемников излучения.

О.И. Останина – участие в разработке конструкции измерительной установки, проведении измерений и оценке метрологических и технических характеристик разработанной измерительной установки.

Authors' contributions

A.S. Sigov – choice of the prospect area of research based on the use of methods and means of metrological support of modern technologies, such as nanophotolithography in the electronic industry; analysis and assessment of the results obtained.

N.B. Golovanova – assessment of the chosen research method effectiveness, participation in the choice of the experimental setup optimal composition in the study of characteristics of the electronics industry components, as well as in the calibration of radiometers and photometers of optical radiation.

O.A. Minaeva – conducting theoretical and experimental studies, participating in the development of a spectroradiometric installation for measuring the characteristics of radiation sources and receivers with traceability to a reference source of synchrotron radiation, estimating measurement errors.

S.I. Anevsky – conducting experimental spectroradiometric studies to solve fundamental metrological problems of reproduction and transmission of spectroradiometry units using the theoretical foundations of synchrotron radiation.

R.V. Shamin – theoretical justification for the use of a synchrotron radiation reference source to assess the characteristics of radiation sources and receivers.

O.I. Ostanina – participation in the measuring installation design, conducting measurements, and evaluation of metrological and technical characteristics of the developed measuring installation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Richter M., Ulm G. Metrology with Synchrotron Radiation. In: Jaeschke E., Khan S., Schneider J.R., Hastings J.B. (Eds.). *Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*. Springer; 2020. P. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04507-8_63-1
2. Li H., Li B., Wang S., Li Z., Qi J., Yu M., Huang Y., Li Y., Barboutis A., Lubeck J., Klein R., Kroth S., Paustian W., Ressin M., Thornagel R. Research on the irradiance calibration of a VUV dual-grating spectrometer based on synchrotron radiation. *Opt. Commun.* 2020;475:126254. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126254>
3. Hurdax P., Hollerer M., Egger L., Koller G., Yang X., Haags A., Soubatch S., Tautz F.S., Richter M., Gottwald A., Puschnig P., Sterrer M., Ramsey M.G. Controlling the electronic and physical coupling on dielectric thin films. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2020;11:1492–1503. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.132>
4. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., et al. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography. *Optic. Lett.* 2017;42(24):5070–5073. <https://doi.org/10.1364/ol.42.005070>
5. Steiger A., Kehrt M., Deninger A. A reference material for accurate THz measurements. In: *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. 2018:8510011. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2018.8510011>
6. Sperling A., Meyer M., Pendsa S., Jordan W., Revtova E., Poikonen T., Renaux D., Blattner P. Multiple Transfer Standard for calibration and characterization of the setups for LED lamps and luminaires in industry. *Metrologia*. 2018;55(2):S37–S42. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa173>
7. Сигов А.С., Минаева О.А., Аневский С.И., Лебедев А.М., Минаев Р.В. Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):38–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47> [Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V. Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>]
8. Schneider P., Salfner K., Sperling A., Nevas S., Kröger I., Reiners T. Improved calibration strategy for luminous intensity. *J. Phys.: Conf. Series*. 2018;972(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/972/1/012016>
9. Klein R., Kroth S., Paustian W., Richter M., Thornagel R. PTB's radiometric scales for UV and VUV source calibration based on synchrotron radiation. *Metrologia*. 2018;55(3):386. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aab803>
10. Reichel T., Gottwald A., Kroth U., Laubis C., Scholze F. Developments in calibration of EUV and VUV detectors for solar orbiter instrumentation using synchrotron radiation. In: *Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, 990547990547-6. <https://doi.org/10.1117/12.2231405>
11. Sildoja M., Nevas S., Pape S., Pendsa S., Sperfeld P., Kemus F. LED-based UV monitoring source. In: *13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2017)*, Proceedings. 2017: 92–93.
12. Schwihys J. On the classical radiation of accelerated electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912–1925. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
13. Sildoja M., Nevas S., Kouremeti N., Gröbner J., Pape S., Pendsa S., Sperfeld P., Kemus F. LED-based UV source for monitoring spectroradiometer properties. *Metrologia*. 2018;55(3):97–103. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aab639>
14. Schmähling F., Wuebbeler G., Krueger U., Ruggaber B., Schmidt F., Taubert R.D., Sperling A., Elster C. Uncertainty evaluation and propagation for spectral measurements. *Color Research & Application*. 2018;43(1):6–16. <https://doi.org/10.1002/col.22185>
15. McEvoy H.C., Martin M.-J., Steiner A., Schreiber E., Girard F., Battuello M., Sadli M., Ridoux P., Gutschwager B., Hollandt J., Diril A., Pehlivan Ö. Report on the measurement results for the EURAMET 658 extension: project to examine underlying parameters in radiance scale realization. *Metrologia*. 2018;55(1A):03001. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/55/1A/03001>
16. Zuber R., Sperfeld P., Nevas S., Sildoja M. A stray light corrected array spectroradiometer for complex high dynamic range measurements in the UV spectral range. In: *13th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2017)*, Proceedings. 2017:65–66.
17. Kokka F., Poikonen T., Blattner P., Jost S., Ferrero S., Pulli T., Ngo M., Thorseth A., Gerloff T., Dekker P., Stuker F., Klej A., Ludwig K., Schneider M., Reiners T., Ikonen E. Development of LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry. *Metrologia*. 2018;55(4):526–534. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaae7>
18. Ferrero A., Velázquez J.L., Pons A., Campos J. Index for the evaluation of the general photometric performance of photometers. *Opt. Express*. 2018;26(14):18633–18643. <https://doi.org/10.1364/OE.26.018633>
19. Gutschwager B., Hollandt J. Nonuniformity correction of infrared cameras by reading radiance temperatures with a spatially nonhomogeneous radiation source. *Meas. Sci. Technol.* 2017;28(1):015401. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/015401>
20. Strothkämper C., Ferrero A., Koo A., Jaanson P., Ged G., Obein G., Källberg S., Audenaert J., Leloup F.B., Martínez-Verdú F.M., Perales E., Schirmacher A., Campos J. Multilateral spectral radiance factor scale comparison. *Appl. Opt.* 2017;56(7):1996–2006. <https://doi.org/10.1364/ao.56.001996>
21. Kokka A., Pulli T., Poikonen T., Askola J., Ikonen E. Fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres. *Metrologia*. 2017;54(4):577–583. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7cb7>

22. Kokka A., Pulli T., Ferrero A., Dekker P., Thorseth A., Kliment P., Klej A., Gerloff T., Ludwig K., Poikonen T., Ikonen E. Validation of the fisheye camera method for spatial non-uniformity corrections in luminous flux measurements with integrating spheres. *Metrologia*. 2019;56(4):045002. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab17fe>

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик Российской академии наук, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Голованова Наталия Борисовна, д.э.н., профессор, заместитель первого проректора ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Минаева Ольга Александровна, д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Аневский Сергей Иосифович, д.т.н., профессор кафедры метрологии и стандартизации Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Шамин Роман Вячеславович, д.ф.-м.н., директор Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shamin@mirea.ru. Scopus Author ID 6506250832, <https://orcid.org/0000-0002-3198-7501>

Останина Ольга Ивановна, к.х.н., доцент кафедры метрологии и стандартизации, Институт перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ostanina@mirea.ru. Scopus Author ID 9249650700, <https://orcid.org/0000-0002-5455-0046>

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Nataliya B. Golovanova, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy First Vice-Rector, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: golovanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57191447039, <https://orcid.org/0000-0002-9901-8897>

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: minaeva_o@mirea.ru. Scopus Author ID 6603019847, <https://orcid.org/0000-0001-9465-3210>

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anevskij@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9197-0034>

Roman V. Shamin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: shamin@mirea.ru. Scopus Author ID 6506250832, <https://orcid.org/0000-0002-3198-7501>

Olga I. Ostanina, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor, Department of Metrology and Standardization, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ostanina@mirea.ru. Scopus Author ID 9249650700, <https://orcid.org/0000-0002-5455-0046>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 535.015
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Высокотемпературные квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: оптимизация дизайнов и экспериментальные результаты

Д.В. Ушаков¹,
А.А. Афоненко¹,
И.А. Глинский²,
Р.А. Хабибуллин^{2, 3, @}

¹ Белорусский государственный университет, Минск, 220030 Республика Беларусь

² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук, Москва, 117105 Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург,
194021 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: khabibullin@isvch.ru

Резюме

Цели. Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона (ТГц ККЛ) являются компактными твердотельными приборами с инжекционной накачкой, которые позволяют генерировать излучение в диапазоне от 1.2 до 5.4 ТГц. В полосе рабочих частот ТГц ККЛ находятся линии поглощения для ряда веществ, актуальных для медико-биологических и экологических приложений. Для широкого применения ТГц ККЛ в данных приложениях необходимо увеличивать рабочую температуру лазеров, что позволит уменьшить размеры и стоимость ТГц ККЛ, а также упростит использование данных ТГц-источников.

Методы. В работе для расчета электронного транспорта в ТГц ККЛ использовалась система балансных уравнений на основе базиса волновых функций с уменьшенными дипольными моментами туннельно-связанных состояний.

Результаты. В результате расчетов предложен оригинальный зонный дизайн с периодом на основе трех GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As квантовых ям (КЯ) и максимумом усиления около 3.3 ТГц. На основе разработанного дизайна был экспериментально изготовлен ТГц ККЛ, что включало рост лазерной структуры методом молекулярно-лучевой эпитаксии, постростовой процессинг для формирования полосковых лазеров с двойным металлическим волноводом и сборку лазеров на теплоотводе. Изготовленные ТГц ККЛ продемонстрировали генерацию вплоть до температуры 125 К, что согласуется с проведенными расчетами. Также в работе проведено исследование зонных дизайнов на основе двух GaAs/Al_xGa_{1-x}As КЯ с различным содержанием алюминия в барьерных слоях ($x = 0.20, 0.25$ и 0.30).

Выводы. Рассчитанные температурные зависимости пикового усиления для двух-КЯ дизайнов с $x > 0.2$ подтверждают возможность создания ТГц ККЛ, работающих при температурах выше 200 К. Таким образом, в работе предложены двух-КЯ зонные дизайны, которые превосходят по максимальной рабочей температуре существующие рекордные высокотемпературные дизайны ТГц ККЛ.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, терагерцовый диапазон, квантовая яма, молекулярно-лучевая эпитаксия

• Поступила: 17.11.2021 • Доработана: 28.02.2022 • Принята к опубликованию: 15.04.2022

Для цитирования: Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Глинский И.А., Хабибуллин Р.А. Высокотемпературные квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: оптимизация дизайнов и экспериментальные результаты. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):45–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

High-temperature terahertz quantum-cascade lasers: design optimization and experimental results

Dmitrii V. Ushakov ¹,
Alexander A. Afonenko ¹,
Igor A. Glinskiy ²,
Rustam A. Khabibullin ^{2, 3, @}

¹ Belarusian State University, Minsk, 220030 Belarus

² Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105 Russia

³ Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia

@ Corresponding author, e-mail: khabibullin@isvch.ru

Abstract

Objectives. Terahertz quantum-cascade lasers (THz QCLs) are compact solid-state lasers pumped by electrical injection to generate radiation in the range from 1.2 to 5.4 THz. The THz QCL operating frequency band contains absorption lines for a number of substances that are suitable for biomedical and environmental applications. In order to reduce the size and cost of THz QCLs and simplify the use of THz sources in these applications, it is necessary to increase the operating temperature of lasers.

Methods. To calculate electron transport in THz QCLs, we used a system of balance equations based on wave functions with reduced dipole moments of tunnel-bound states.

Results. As a result of the calculations, an original band design with a period based on three GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As quantum wells (QWs) and a gain maximum at about 3.3 THz was proposed. Based on the developed design, a THz QCL was fabricated, including the growth of a laser structure by molecular beam epitaxy, postgrowth processing to form strip lasers with a double metal waveguide, as well as an assembly of lasers mounted on a heat sink. The developed THz QCLs was capable of lasing at temperatures of up to 125 K as predicted by the performed calculations. We also studied band designs based on two GaAs/Al_xGa_{1-x}As QWs having varying aluminum contents in the barrier layers ($x = 0.20, 0.25, \text{ and } 0.30$).

Conclusions. The calculated temperature dependences of the peak gain for two-QW designs with $x > 0.2$ confirm the possibility of creating THz QCLs operating at temperatures above 200 K. Thus, we have proposed two-QW band designs that outperform existing high-temperature designs in terms of maximum operating temperature.

Keywords: quantum cascade laser, terahertz range, quantum well, molecular beam epitaxy

• Submitted: 17.11.2021 • Revised: 28.02.2022 • Accepted: 15.04.2022

For citation: Ushakov D.V., Afonenko A.A., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A. High-temperature terahertz quantum-cascade lasers: design optimization and experimental results. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):45–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовый диапазон частот (1–10 ТГц) по-прежнему остается одной из самых интригующих областей электромагнитного спектра, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для большого числа прикладных задач. Долгое время сдерживающим фактором использования всех преимуществ ТГц-волн в спектроскопии, визуализации и удаленном зондировании оставалось отсутствие компактных твердотельных источников ТГц-излучения с мВт-уровнем средней мощности. Возможность «переноса» схемы работы квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего инфракрасного (СИ) диапазона в ТГц-область позволило продемонстрировать уникальный источник ТГц-излучения, в котором за счет изменения толщин полупроводниковых слоев можно перестраивать частоту генерации от 1.2 до 5.4 ТГц без использования больших магнитных полей. Однако по сравнению с СИ ККЛ, где продемонстрированы рабочие температуры более 300 К, для работы ТГц ККЛ долгое время требовалось криогенное охлаждение. Задача повышения рабочих температур ТГц ККЛ до температур работы термоэлектрических охладителей на основе эффекта Пельтье является крайне актуальной для того, чтобы ТГц ККЛ смогли «выйти» из лабораторий и начать широко использоваться в медицине, биологии, сельском хозяйстве, экологии, борьбе с терроризмом и беспроводной связи [1–8].

Первые ТГц ККЛ требовали криогенного охлаждения, когда чип лазера необходимо было монтировать на холодную плату заливного криостата или криорефрижератора замкнутого цикла, что значительно ограничивало малогабаритность и энергоэффективность данных ТГц-источников, а также осложняло использование лазеров данного типа вне лабораторий. Оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ и использование волноводов с низким уровнем потерь привели к росту рабочей температуры данных лазеров. Это позволило использовать для охлаждения ТГц ККЛ компактные электрические криоохладители, работающие по циклу Стирлинга, не требующие криогенных жидкостей и имеющие ресурс более 30 000 часов. Недостатком данного подхода является высокая стоимость криоохладителей Стирлинга (десятки тысяч долларов США), что также ограничивало широкое применение ТГц ККЛ.

Продолжение работ по исследованию электронного транспорта [9] и созданию более продуманных зонных дизайнов активной области ТГц ККЛ в 2019 г. позволило продемонстрировать первые лазеры с максимальной рабочей температурой 210.5 К (–63 °С) и термоэлектрическим охлаждением [10], что, безусловно, является революционным результатом с точки зрения возможности применения данных ТГц-источников. В конце 2020 г. были опубликованы данные о достижении нового рекорда – ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой 250 К (около –23 °С) [11]. Это позволило использовать для охлаждения ТГц ККЛ однокаскадный элемент Пельтье, цена которого не превышает 100 долл. США. При этом необходимо отметить, что в приведенных работах 2019 и 2020 гг. используются схожие зонные дизайны активной области с периодом на основе двух квантовых ям (КЯ), отличающиеся высотой потенциальных барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – $x = 0.25$ ([10], 2019 г.) и $x = 0.30$ ([11], 2020 г.). Используемый зонный дизайн и подход к увеличению высоты потенциальных барьеров в первую очередь направлены на подавление паразитных каналов утечки электронов в континуум, поскольку данные паразитные каналы проводимости в активной области негативно сказываются на работе ТГц ККЛ при высоких температурах [12]. При этом увеличение высоты потенциальных барьеров приводит к необходимости уменьшать их толщину для сохранения туннельной прозрачности, что в свою очередь приводит к еще более высоким требованиям к эпитаксиальному росту таких гетероструктур с чрезвычайно тонкими барьерными слоями толщиной в единицы монослоев [13].

Несмотря на то, что работы по созданию ТГц ККЛ в России начались с 10–15-летней задержкой относительно работ зарубежных групп, на сегодняшний день уже продемонстрированы ТГц ККЛ, полностью изготовленные в России, включая рост гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и постростовой процессинг полосковых лазеров с двойным металлическим волноводом [14, 15]. В данной работе представлены экспериментальные результаты по исследованию ТГц ККЛ на основе оригинального дизайна активной области с периодом, содержащим три КЯ $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$. Также приведены результаты оптимизации зонных дизайнов ТГц ККЛ с периодом на основе двух КЯ $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 для работы при высоких температурах (более 200 К).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТГц ККЛ С ПЕРИОДОМ НА ОСНОВЕ ТРЕХ КЯ GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As

Резонансно-фононный дизайн, в котором происходит последовательное резонансное туннелирование электронов на верхний лазерный уровень, испускание ТГц-фотона и депопуляция нижнего лазерного уровня за счет рассеяния электронов на продольных оптических фононах (longitudinal-optical phonons, LO-фононах), продемонстрировал на сегодняшний день наиболее высокие рабочие температуры ТГц ККЛ. Использование диагональных излучательных переходов позволило существенно снизить скорость безызлучательной рекомбинации «горячих» электронов с верхнего лазерного уровня на нижний из-за температурной активации испускания LO-фононов. Основываясь на выше-сказанном, для оптимизации активной области высокотемпературного ТГц ККЛ был выбран резонансно-фононный дизайн с периодом из трех КЯ GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As и частотой генерации около 3.3 ТГц.

На основе ранее разработанного метода системы балансных уравнений [16, 17] была проведена численная оптимизация дизайна активной области ТГц ККЛ для достижения максимальной рабочей температуры. В ходе оптимизации происходило сканирование толщин всех слоев периода в широком диапазоне (толщин КЯ и барьеров) с шагом, равным половине постоянной кристаллической решетки GaAs. В процедуре отбора оптимальных дизайнов было условие обеспечения максимального усиления на положительной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ), чтобы в системе не возникали электрические неустойчивости и не образовывались электро-полевые домены. Максимальная рабочая температура дизайна соответствовала точке пересечения температурных зависимостей усиления и потерь в резонаторе, которые были рассчитаны ранее для ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом [16].

В ходе проведенной оптимизации был разработан оригинальный GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As зонный дизайн на основе периода, состоящего из последовательности толщин слоев, начиная с барьера инжектора: 4.23/16.09/3.95/8.75/2.54/8.18 нм (КЯ GaAs выделены жирным шрифтом). Легирование активного модуля донорной примесью Si составляло $3.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При моделировании высота потенциальных барьеров Al_{0.18}Ga_{0.82}As в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 164 \text{ мэВ}$.

Иллюстрация электронного транспорта в разработанном зонном дизайне представлена на рис. 1, где стрелками показано протекание тока через уровни размерного квантования в двух периодах. Количество стрелок между уровнями пропорционально плотности тока. Плотность тока через период соответствует

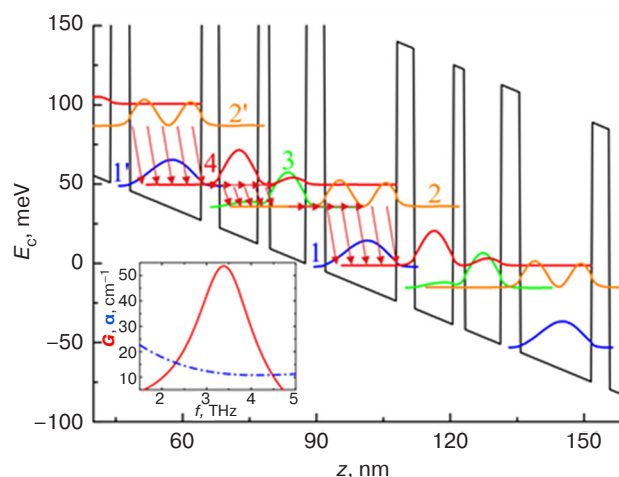


Рис. 1. Профиль энергии дна зоны проводимости E_c , уровни энергии (пронумерованы цифрами) и базисные волновые функции после процедуры локализации (модель сильной связи)

для двух последовательных активных модулей при напряжении $V_1 = 51 \text{ мВ}$ и температуре 77 К

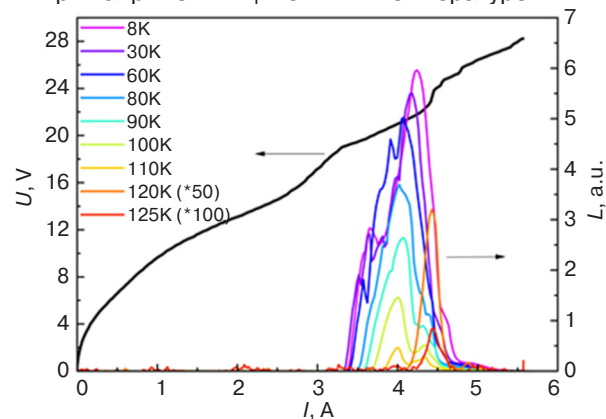


Рис. 2. ВАХ (черная линия) и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ #52111 в диапазоне температур от 8 К до 125 К . Амплитуда интегрального сигнала для температур 120 К и 125 К умножена на 50 и 100 соответственно

пяти стрелкам. При оптимизации были минимизированы паразитные каналы проводимости, которые имеют плотности тока менее одной стрелки (не отображены на рис. 1). Диагональный лазерный переход E_{43} с матричным элементом дипольных переходов $Z_{43} = 3.8 \text{ нм}$ соответствует частоте генерации $3.3\text{--}3.4 \text{ ТГц}$. На вставке рис. 1 приведен спектр усиления разработанного дизайна (красная линия) и спектр потерь в резонаторе (синяя штрихпунктирная линия).

Лазерная структура на основе разработанного зонного дизайна GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As была выращена методом МЛЭ на установке Riber Compact 21T в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (группа проф. И.С. Васильевского). При отработке оптимальных ростовых параметров особое внимание уделялось подбору технологических условий роста (температуры подложки, потока мышьяка As₄), точной калибровке скоростей роста соединений

GaAs и AlAs и их стабильности в течение роста структур большой толщины. Время роста одной лазерной структуры составляло более 10 ч без учета роста калибровочных сверхрешеток, которые выращивали до и после роста лазерной структуры. Отклонение толщины периода выращенной структуры от номинального (заданного в дизайне) не превышало 1%.

На основе выращенной лазерной структуры были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом (ДМВ). Процедура изготовления полосковых лазеров с Au–Au ДМВ подробно описана в работах [18, 19]. Выколотые полосковые ТГц ККЛ с резонатором Фабри – Перо были смонтированы в НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха (группа С.М. Сапожникова) на радиаторы C-mount; электрический контакт осуществлялся путем приваривания к верхнему металлу лазерного полоска большого числа золотых проволочек диаметром 30 мкм, распределенных равномерно по всей длине полоска для улучшения электрической инжекции по всей поверхности лазера [20].

Излучательные характеристики изготовленных лазеров измерялись в Институте физики микроструктур Российской академии наук (группа проф. В.И. Гавриленко). Исследования ВАХ и зависимостей интегральной интенсивности излучения от тока накачки и температуры изготовленных ТГц-лазеров проводились в импульсном режиме (длительность импульса 500 нс, частота повторения 100 Гц). Для питания структур использовался специально изготовленный электронный ключ, позволяющий получать импульсы заданной длительности, скважности и амплитуды, а также измерять напряжение и ток, проходящий через лазер. При измерениях ВАХ и интегральных зависимостей излучения от тока/температуры сигнал с детектора подавался на двухканальный строб-интегратор Stanford Research Systems SR250 (Саннивейл, Калифорния, США).

Для определения максимальной рабочей температуры были измерены зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки. На рис. 2 видно, что увеличение температуры с 8 до 60 К слабо влияет на выходную мощность и на значение порогового тока. При приближении к 100 К интенсивность оптического сигнала начинает резко уменьшаться. При температурах выше 100 К начинает резко расти значение порогового тока, что, скорее всего, связано с активацией паразитных каналов проводимости. Максимальная температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила около 125–130 К. Нужно отметить, что в качестве волноводной системы для вывода излучения ТГц ККЛ из криостата была использована металлическая трубка, которая обладает своим уровнем потерь в ТГц-диапазоне. Можно предположить, что реальная максимальная рабочая температура ТГц ККЛ выше на 5–10 К, т.е. составляет около 140 К.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗОННОГО ДИЗАЙНА ТГц ККЛ НА ОСНОВЕ ДВУХ КВАНТОВЫХ ЯМ GaAs/Al_xGa_{1-x}As C $x = 0.20, 0.25$ И 0.30

Для дальнейшего улучшения высокотемпературных характеристик ТГц ККЛ необходимо разработать новые концепции зонных дизайнов активных областей и снижать потери в резонаторе. Ранее нами были предложены подходы по снижению потерь в ТГц ККЛ, в том числе на основе использования двойного металлического волновода из серебра [21, 22]. Для увеличения максимальной рабочей температуры ТГц ККЛ мы предложили провести исследование зонных дизайнов на основе двух КЯ GaAs/Al_xGa_{1-x}As с разной высотой потенциальных барьеров: $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 .

Для расчета характеристик ТГц ККЛ мы использовали метод системы балансных уравнений с базисом волновых функций в приближении сильной связи. Этот базис был получен как суперпозиция собственных состояний уравнения Шредингера для всей активной области ТГц ККЛ путем минимизации пространственного расширения волновых функций туннельно-связанных состояний. Локализованный базис волновых функций в приближении сильной связи более устойчив к влиянию эффекта дефазировки, т.к. вырожденные базисные состояния с $\Delta E \lesssim 3$ мэВ имеют небольшое перекрытие волновых функций и, соответственно, низкую скорость рассеяния. Мы проанализировали зонные дизайны ТГц ККЛ на основе двух КЯ GaAs/Al_xGa_{1-x}As и оптимизировали высоту потенциальных барьеров с различным содержанием алюминия (см. таблицу).

На рис. 3 демонстрируется принцип действия предложенных дизайнов и ток через уровни энергий (красные стрелки). Видно, что существует несколько каналов проводимости между электронными уровнями, включая переход 3–2 между верхним и нижним лазерными уровнями, а также паразитные переходы между уровнями 3 и 1. На рис. 4 приведено сравнение температурных зависимостей максимального усиления на частоте 3.9 ТГц, которые демонстрируют возможность работы при температурах выше 200 К для дизайнов с содержанием $x > 0.2$. Для сравнения

Таблица. Параметры оптимизированных зонных дизайнов активного модуля ТГц ККЛ на основе двух квантовых ям GaAs/Al_xGa_{1-x}As

Дизайн	x	Высота барьера ΔE_c , мэВ	Последовательность слоев в периоде: потенциальный барьер / квантовая яма, нм
Bosco [10]	0.25	212.5	1.98/16.37/3.39/7.91
A	0.20	178.5	2.3/16.4/4.2/7.3
B	0.25	212.5	2.0/17.2/3.4/7.9
C	0.30	244.5	1.7/17.0/3.1/7.9

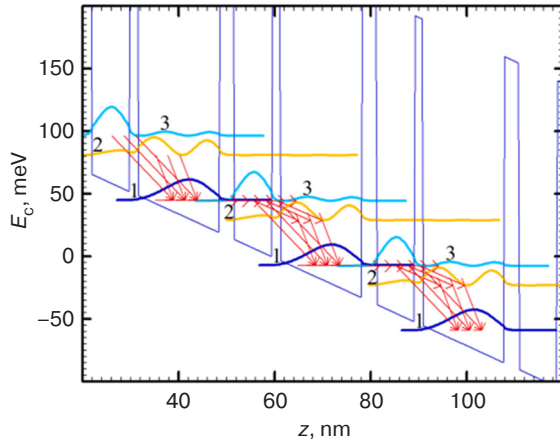


Рис. 3. Зонная диаграмма для дизайна С

приведена расчетная зависимость коэффициента усиления от температуры (синяя линия) для зонного дизайна на основе трех КЯ GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As, предложенной в работе [10], с экспериментальной максимальной рабочей температурой $T_{\text{max}} = 210.5$ K.

Оптимизация дизайнов с усилением, превышающим потери при высоких температурах (210–240 K), была получена путем сканирования толщины активного модуля в диапазоне от 24 до 36 нм. При этом толщина барьерных слоев Al_xGa_{1-x}As варьировалась в диапазоне 1.4–4.0 нм, а квантовых ям

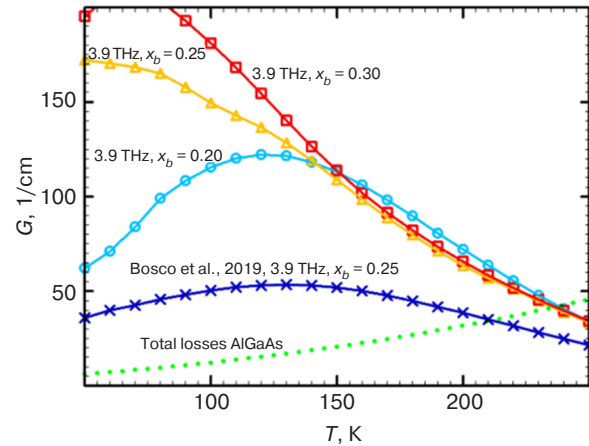
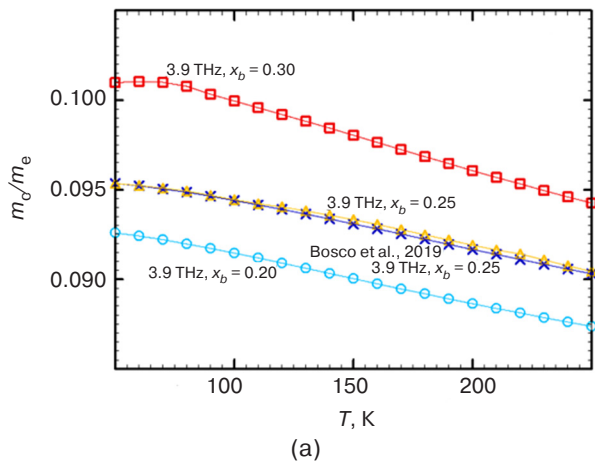
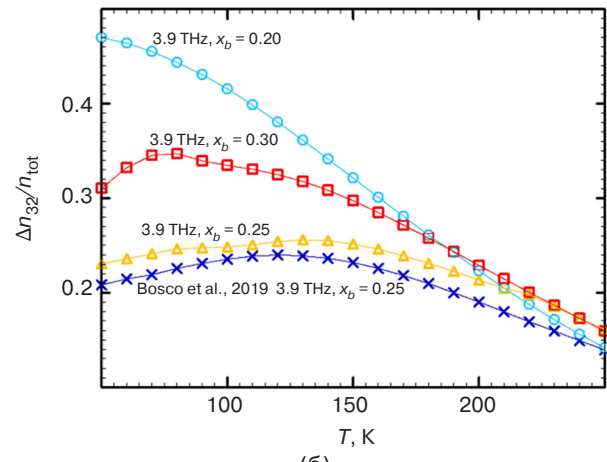


Рис. 4. Температурные зависимости максимального усиления G для конструкции GaAs/Al_xGa_{1-x}As с различным содержанием Al в барьерах

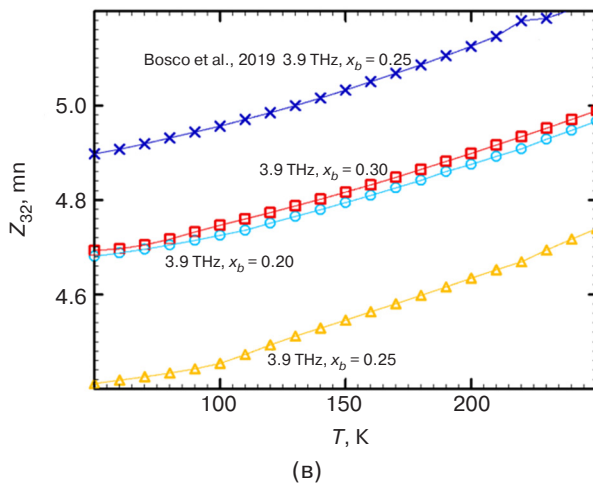
GaAs – в диапазоне 6.3–20.0 нм с шагом, равным половине постоянной решетки GaAs. Параметры оптимизированных конструкций активных модулей при различном составе барьерных слоев (содержания x) представлены в таблице. В последовательности слоев периода квантовые ямы GaAs выделены жирным шрифтом. Центральная часть широкой КЯ GaAs легирована кремнием с концентрацией слоев $4.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, как в работе [3].



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Температурные зависимости эффективной массы электронов m_e (а), инверсии населенности $\Delta n_{32}/n_{\text{tot}}$ – полная концентрация электронов в периоде (б) и матричных элементов дипольных переходов Z_{32} (в) для оптимизированного дизайна А ($x_b = 0.20$), В ($x_b = 0.25$) и С ($x_b = 0.30$)

Основными факторами, влияющими на усиление в ККЛ, являются: эффективная масса электронов m_c , инверсия населенностей n_{32} лазерных уровней и матричные элементы дипольных переходов Z_{32} [23–25]. Таким образом, коэффициент усиления активного модуля ККЛ можно представить как произведение данных параметров $G \sim m_c^{-3/2} n_{32} Z_{32}^2$. Это означает, что для эффективного усиления в ККЛ требуется малая эффективная масса электрона, большая инверсия населенностей и дипольные матричные элементы переходов. Температурные зависимости этих значений для оптимизированных активных модулей, по сравнению с дизайном Bosco [3], показаны на рис. 5. Следует отметить, что эффективная масса электронов увеличивается в дизайнах с более высокими потенциальными барьерами (с более высоким содержанием алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) из-за эффекта непараболичности, как показано на рис. 5а. В то же время m_c уменьшается при повышенных температурах для всех исследуемых дизайнов. В оптимизированных дизайнах В и С (рис. 5б) инверсия населенности больше при температурах выше 200 К. Как видно из рис. 5в, матричные элементы дипольных переходов данных дизайнов увеличиваются с увеличением температуры от 50 до 250 К: с 4.9 до 5.2 (дизайн Bosco 2019), с 4.7 до 5.0 (дизайн А), с 4.4 до 4.7 (дизайн В) и от 4.7 до 5.0 нм (дизайн С). Таким образом, сочетание всех трех факторов для всех оптимизированных дизайнов А ($x_b = 0.20$), В ($x_b = 0.25$) и С ($x_b = 0.30$) позволяет ожидать максимальную рабочую температуру – 238 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен оригинальный зонный дизайн с периодом на основе трех $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ квантовых ям и экспериментально реализован ТГц ККЛ

на основе данного дизайна с максимальной рабочей температурой более 125 К. Были исследованы зонные дизайны на основе двух $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ квантовых ям с различным содержанием алюминия: $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 . Рассчитанные температурные зависимости пикового усиления для двух-КЯ дизайнов с $x > 0.2$ подтверждают возможность создания ТГц ККЛ, работающего при температурах свыше 200 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» (НИЧ 28/21) в рамках теоретических исследований и при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-30020 в рамках изготовления ТГц ККЛ.

Вклад авторов

Д.В. Ушаков – численная оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ.

А.А. Афоненко – численная оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ.

И.А. Глинский – расчет потерь в резонаторе ТГц ККЛ.

Р.А. Хабибуллин – изготовление и измерение излучательных характеристик ТГц ККЛ.

Authors' contributions

D.V. Ushakov – numerical optimization of THz QCL designs.

A.A. Afonenko – numerical optimization of THz QCL designs.

I.A. Glinskiy – calculation of losses in the THz QCL resonator.

R.A. Khabibullin – fabrication and measurement of the emission characteristics of THz QCLs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sampaolo A., Yu C., Wei T., Zifarelli A., Giglio M., Patimisco P., Zhu H., Zhu H., He L., Wu H., Dong L., Xu G., Spagnolo V. H_2S quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor employing a liquid-nitrogen-cooled THz quantum cascade laser operating in pulsed mode. *Photoacoustics*. 2021;21:100219. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100219>
2. Consolino L., Nafa M., De Regis M., Cappelli F., Garrasi K., Mezzapesa F.P., Li L., Davies A.G., Linfield E.H., Vitiello M.S., Bartalini S., De Natale P. Quantum cascade laser based hybrid dual comb spectrometer. *Commun. Phys.* 2020;3(1):69. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0344-0>
3. Irimajiri Y., Morohashi I., Kawakami A. Multifrequency heterodyne detection of molecules using a hot electron bolometer mixer pumped by two phase-locked THz-quantum cascade lasers. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(5):474–479. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2990358>

REFERENCES

1. Sampaolo A., Yu C., Wei T., Zifarelli A., Giglio M., Patimisco P., Zhu H., Zhu H., He L., Wu H., Dong L., Xu G., Spagnolo V. H_2S quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor employing a liquid-nitrogen-cooled THz quantum cascade laser operating in pulsed mode. *Photoacoustics*. 2021;21:100219. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100219>
2. Consolino L., Nafa M., De Regis M., Cappelli F., Garrasi K., Mezzapesa F.P., Li L., Davies A.G., Linfield E.H., Vitiello M.S., Bartalini S., De Natale P. Quantum cascade laser based hybrid dual comb spectrometer. *Commun. Phys.* 2020;3(1):69. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0344-0>
3. Irimajiri Y., Morohashi I., Kawakami A. Multifrequency heterodyne detection of molecules using a hot electron bolometer mixer pumped by two phase-locked THz-quantum cascade lasers. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(5):474–479. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2990358>

4. Jin Y., Reno J.L., Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode. *Optica*. 2020;7(6):708–715. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.390852>
5. Rakić A.D., Taimre T., Bertling K., Lim Y.L., Dean P., Valavanis A., Indjin D. Sensing and imaging using laser feedback interferometry with quantum cascade lasers. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(2):021320. <https://doi.org/10.1063/1.5094674>
6. Dunn A., Poyser C., Dean P., Demić A., Valavanis A., Indjin D., Salih M., Kundu I., Li L., Akimov A., Davies A.G., Linfield E., Cunningham J., Kent A. High-speed modulation of a terahertz quantum cascade laser by coherent acoustic phonon pulses. *Nat. Commun.* 2020;11:835. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14662-w>
7. Hagelschuer T., Richter H., Wienold M., Lü X., Röben B., Schrottke L., Biermann K., Grahn H., Hübers H. A compact 4.75-THz source based on a quantum-cascade laser with a back-facet mirror. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019;9(6):606–612. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2935337>
8. Schrottke L., Ropcke J., Grahn H.T., Lu X., Röben B., Drude P., Biermann K., Hagelschuer T., Wienold M., Hübers H.-W., Hannemann M., Hubertus van Helden J.-P. High-performance GaAs/AlAs terahertz quantum-cascade lasers for spectroscopic applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(2):133–140. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2957456>
9. Franckić M., Bosco L., Beck M., Bonzon C., Mavrona E., Scalari G., Wacker A., Faist J. Two-well quantum cascade laser optimization by non-equilibrium Green's function modelling. *Appl. Phys. Lett.* 2018;112:021104. <https://doi.org/10.1063/1.5004640>
10. Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K. *Appl. Phys. Lett.* 2019;115:010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
11. Khalatpour A., Paulsen A.K., Deimert C., Wasilewski Z.R., Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nat. Photonics*. 2021;15:16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
12. Kainz M.A., Schönhuber S., Andrews A.M., Detz H., Limbacher B., Strasser G., Unterrainer K. Barrier height tuning of THz quantum cascade lasers for high temperature operation. *ACS Photonics*. 2018;5(11):4687–4693. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01280>
13. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
14. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Павлов А.Ю., Пономарев Д.С., Томош К.Н., Галиев Р.Р., Мальцев П.П., Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Зубов Ф.И., Алфёров Ж.И. Изготовление терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2016;50(10):1395–1400.
4. Jin Y., Reno J.L., Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode. *Optica*. 2020;7(6):708–715. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.390852>
5. Rakić A.D., Taimre T., Bertling K., Lim Y.L., Dean P., Valavanis A., Indjin D. Sensing and imaging using laser feedback interferometry with quantum cascade lasers. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(2):021320. <https://doi.org/10.1063/1.5094674>
6. Dunn A., Poyser C., Dean P., Demić A., Valavanis A., Indjin D., Salih M., Kundu I., Li L., Akimov A., Davies A.G., Linfield E., Cunningham J., Kent A. High-speed modulation of a terahertz quantum cascade laser by coherent acoustic phonon pulses. *Nat. Commun.* 2020;11:835. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14662-w>
7. Hagelschuer T., Richter H., Wienold M., Lü X., Röben B., Schrottke L., Biermann K., Grahn H., Hübers H. A compact 4.75-THz source based on a quantum-cascade laser with a back-facet mirror. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019;9(6):606–612. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2935337>
8. Schrottke L., Ropcke J., Grahn H.T., Lu X., Röben B., Drude P., Biermann K., Hagelschuer T., Wienold M., Hübers H.-W., Hannemann M., Hubertus van Helden J.-P. High-performance GaAs/AlAs terahertz quantum-cascade lasers for spectroscopic applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(2):133–140. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2957456>
9. Franckić M., Bosco L., Beck M., Bonzon C., Mavrona E., Scalari G., Wacker A., Faist J. Two-well quantum cascade laser optimization by non-equilibrium Green's function modelling. *Appl. Phys. Lett.* 2018;112:021104. <https://doi.org/10.1063/1.5004640>
10. Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K. *Appl. Phys. Lett.* 2019;115:010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
11. Khalatpour A., Paulsen A.K., Deimert C., Wasilewski Z.R., Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nat. Photonics*. 2021;15:16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
12. Kainz M.A., Schönhuber S., Andrews A.M., Detz H., Limbacher B., Strasser G., Unterrainer K. Barrier height tuning of THz quantum cascade lasers for high temperature operation. *ACS Photonics*. 2018;5(11):4687–4693. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01280>
13. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
14. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Pavlov A.Yu., Ponomarev D.S., Tomosh K.N., Galiev R.R., Maltsev P.P., Zhukov A.E., Cirilin G.E., Zubov F.I., Alferov Z.I. Fabrication of terahertz quantum cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures. *Semiconductors*. 2016;50(10):1377–1382. <https://doi.org/10.1134/S1063782616100134>

15. Иконников А.В., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Гавриленко В.И., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В., Хабибуллин Р.А., Резник Р.Р., Цырлин Г.Э., Зубов Ф.И., Жуков А.Е., Алфёров Ж.И. Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктурах. *Письма в ЖТФ*. 2017;43(7):86–94. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602>
16. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А., Гавриленко В.И., Васильевский И.С., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag. *Квантовая электроника*. 2018;48(11):1005–1008. <https://doi.org/10.1070/QEL16806>
17. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А., Гавриленко В.И., Волков О.Ю., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций с уменьшенными дипольными моментами туннельно-связанных состояний. *Квантовая электроника*. 2019;49(10):913–918. <https://doi.org/10.1070/QEL17068>
18. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Васильевский И.С., Зайцев А.А., Данилов А.И., Волков О.Ю., Павловский В.В., Маремьянин К.В., Гавриленко В.И. Температурная зависимость порогового тока и выходной мощности квантово-каскадного лазера с частотой генерации 3.3 ТГц. *Физика и техника полупроводников*. 2018;52(11):1268–1273. <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.11.46581.03>
19. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Maremyanin K.V., Volkov O.Yu., Pavlovskiy V.V., Dubinov A.A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(4):329. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.11.002>
20. Долгов А.К., Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дюжигов И.Н., Глинский И.А., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Моделирование эффективности электрической накачки квантово-каскадного терагерцового лазера при неоднородном питании током. *Квантовая электроника*. 2021;51(2):164–168. <https://doi.org/10.1070/QEL17431>
21. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Spectra of mode loss in THz quantum cascade laser with double metal waveguide based on Au, Cu and Ag. *Proc. SPIE*. 2018;11066:1106613. <https://doi.org/10.1117/12.2523284>
22. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskiy V., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser. *Proc. SPIE*. 2019;11022:1102204. <https://doi.org/10.1117/12.2521774>
23. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Ключков А.Н., Глинский И.А., Зенченко Н.В., Пономарев Д.С., Мальцев П.П., Зайцев А.А., Зубов Ф.И., Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Алфёров Ж.И. Энергетический спектр и тепловые свойства терагерцового квантово-каскадного лазера на основе резонансно-фононного дизайна. *Физика и техника полупроводников*. 2017;51(4):540–546. <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.04.44349.8414>
- [Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Pavlov A.Yu., Ponomarev D.S., Tomosh K.N., Galiev R.R., Maltsev P.P., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Zubov F.I., Alferov Z.I. Fabrication of terahertz quantum cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2016;50(10):1395–1400 (in Russ.).]
15. Ikonnikov A.V., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Pavlov A.Yu., Shchavruk N.V., Khabibullin R.A., Reznik R.R., Cirlin G.E., Zubov F.I., Zhukov A.E., Alferov Zh.I. Generation of terahertz radiation in multilayer quantum-cascade heterostructures. *Tech. Phys. Lett.* 2017;43(7):362–365. <https://doi.org/10.1134/S1063785017040083>
- [Original Russian Text: Ikonnikov A.V., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Pavlov A.Yu., Shchavruk N.V., Khabibullin R.A., Reznik R.R., Cirlin G.E., Zubov F.I., Zhukov A.E., Alferov Zh.I. Generation of terahertz radiation in multilayer quantum-cascade heterostructures. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2017;43(7):86–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602>]
16. Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dubinov A.A., Gavrilenko V.I., Vasil'evskii I.S., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A. Mode loss spectra in THz quantum-cascade lasers with gold- and silver-based double metal waveguides. *Quantum Electronics*. 2018;48(11):1005–1008. <https://doi.org/10.1070/QEL16806>
17. Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dubinov A.A., Gavrilenko V.I., Volkov O.Yu., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A. Balance-equation method for simulating terahertz quantum-cascade lasers using a wave-function basis with reduced dipole moments of tunnel-coupled states. *Quantum Electronics*. 2019;49(10):913–918. <https://doi.org/10.1070/QEL17068>
18. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Vasil'evskii I.S., Zaycev A.A., Danilov A.I., Volkov O.Y., Pavlovskiy V.V., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I. Temperature dependences of the threshold current and output power of a quantum-cascade laser emitting at 3.3 THz. *Semiconductors*. 2018;52(11):1380–1385. <https://doi.org/10.1134/S1063782618110118>
- [Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Vasil'evskii I.S., Zaycev A.A., Danilov A.I., Volkov O.Y., Pavlovskiy V.V., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I. Temperature dependences of the threshold current and output power of a quantum-cascade laser emitting at 3.3 THz. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2018;52(11):1268–1273 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.11.46581.03>]
19. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Maremyanin K.V., Volkov O.Yu., Pavlovskiy V.V., Dubinov A.A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(4):329. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.11.002>
20. Dolgov A.K., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dyuzhikov I.N., Glinskiy I.A. Simulation on the nonuniform electrical pumping efficiency of THz quantum-cascade lasers. *Quantum Electronics*. 2021;51(2):164–168. <https://doi.org/10.1070/QEL17431>

24. Цырлин Г.Э., Резник Р.Р., Жуков А.Е., Хабибуллин Р.А., Маремьянин К.В., Гавриленко В.И., Морозов С.В. Особенности роста наноструктур для терагерцевых квантово-каскадных лазеров и их физические свойства. *Физика и техника полупроводников*. 2020;54(9):902–905. <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.09.49829.21>
25. Ushakov D., Afonenko A., Khabibullin R., Ponomarev D., Aleshkin V., Morozov S., Dubinov A. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method. *Opt. Express*. 2020;28(17):25371–25382. <https://doi.org/10.1364/oe.398552>
21. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Spectra of mode loss in THz quantum cascade laser with double metal waveguide based on Au, Cu and Ag. *Proc. SPIE*. 2018;11066:1106613. <https://doi.org/10.1117/12.2523284>
22. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskiy V., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser. *Proc. SPIE*. 2019;11022:1102204. <https://doi.org/10.1117/12.2521774>
23. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Klochkov A.N., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S., Maltsev P.P., Zaycev A.A., Zubov F.I., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Alferov Zh.I. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme. *Semiconductors*. 2017;51(4):514–519. <https://doi.org/10.1134/S106378261704008X>
[Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Klochkov A.N., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S., Maltsev P.P., Zaycev A.A., Zubov F.I., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Alferov Zh.I. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2017;51(4):540–546 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.04.44349.8414>]
24. Cirlin G.E., Reznik R.R., Zhykov A.E., Khabibullin R.A., Maremyanin K.V., Gavrilenco V.I., Morozov S.V. Specific growth features of nanostructures for terahertz quantum cascade lasers and their physical properties. *Semiconductors*. 2020;54:1092–1095. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782620090298>
[Original Russian Text: Cirlin G.E., Reznik R.R., Zhykov A.E., Khabibullin R.A., Maremyanin K.V., Gavrilenco V.I., Morozov S.V. Specific growth features of nanostructures for terahertz quantum cascade lasers and their physical properties. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2020;54(9):902–905 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.09.49829.21>]
25. Ushakov D., Afonenko A., Khabibullin R., Ponomarev D., Aleshkin V., Morozov S., Dubinov A. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method. *Opt. Express*. 2020;28(17):25371–25382. <https://doi.org/10.1364/oe.398552>

Об авторах

Ушаков Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, декан факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет (220030, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, д. 4). E-mail: ushakovDVU@gmail.com. Scopus Author ID 6701760232, ResearcherID K-4878-2013, <https://orcid.org/0000-0002-2108-7024>

Афоненко Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники, Белорусский государственный университет (220030, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, д. 4). E-mail: afonenko@bsu.by. Scopus Author ID 6603664811.

Глинский Игорь Андреевич, младший научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Хабибуллин Рустам Анварович, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт сверхвысоко-частотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5); ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26). E-mail: khabibullin@isvch.ru. Scopus Author ID 55018400000, ResearcherID B-6594-2012, <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>

About the authors

Dmitrii V. Ushakov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Dean of the Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University (4, Nezavisimosti pr., Minsk, 220030 Belarus). E-mail: ushakovDVU@gmail.com. Scopus Author ID 6701760232, ResearcherID K-4878-2013, <https://orcid.org/0000-0002-2108-7024>

Alexander A. Afonenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti pr., Minsk, 220030 Belarus). E-mail: afonenko@bsu.by. Scopus Author ID 6603664811.

Igor A. Glinskiy, Junior Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Rustam A. Khabibullin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Leading Researcher, Ioffe Institute (26, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 194021 Russia). E-mail: khabibullin@isvch.ru. Scopus Author ID 55018400000, ResearcherID B-6594-2012, <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.915
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-56-63>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование зонной структуры двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$

Н.Ю. Пименов[@],
С.Д. Лавров,
А.В. Кудрявцев,
А.Ю. Авдигиян

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: nikitapimenov13@gmail.com

Резюме

Цели. Благодаря наличию прямозонного перехода с шириной запрещенной зоны, соответствующей видимой и ближней инфракрасной областям спектра, двумерные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) находят применение в различных оптических приложениях. Однако ограниченный набор существующих ДПМ делает область используемого спектрального диапазона дискретной. Наиболее эффективным способом решения этой проблемы является использование двумерных пленок ДПМ на основе многокомпонентных твердых растворов, в состав которых входят три и более различных химических элемента (в то время, как ДПМ состоят из двух). Варьируя их морфологический состав, можно управлять значением ширины запрещенной зоны, и, таким образом, их оптическим спектром поглощения. Так как ширина запрещенной зоны в таких структурах сильно нелинейна по отношению к их химическому составу, это затрудняет подбор необходимой концентрации для достижения равномерного поглощения. В связи с этим целью данной работы является теоретическое определение зависимости ширины запрещенной зоны четырехкомпонентных двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ от их морфологического состава.

Методы. Расчеты выполнены в рамках теории функционала плотности с использованием программного пакета *Quantum Espresso*. Двумерные кристаллиты твердых растворов ДПМ были изготовлены из объемных кристаллов ДПМ методикой механической эксфолиации на подложку Si/SiO₂. Экспериментальное исследование фотолюминесцентных характеристик было проведено при помощи фотолюминесцентной микроскопии-спектроскопии.

Результаты. В работе была определена зависимость ширины запрещенной зоны от морфологического состава двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$. Установлено, что при варьировании состава твердых растворов ДПМ ширина запрещенной зоны изменяется от 1.43 до 1.83 эВ. Показано, что полученные теоретические результаты качественно совпадают с экспериментальными данными.

Выводы. Минимальной шириной запрещенной зоны обладают твердые растворы, близкие по своему составу к MoSe_2 , в то время как максимальной – структуры, близкие по своему составу к WS_2 .

Ключевые слова: дихалькогениды переходных металлов, двумерные полупроводники, зонная структура, запрещенная зона, теория функционала плотности

• Поступила: 17.11.2021 • Доработана: 24.02.2022 • Принята к опубликованию: 19.04.2022

Для цитирования: Пименов Н.Ю., Лавров С.Д., Кудрявцев А.В., Авдизиян А.Ю. Моделирование зонной структуры двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):56–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-56-63>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of two-dimensional $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ alloy band structure

Nikita Yu. Pimenov[®],
Sergey D. Lavrov,
Andrey V. Kudryavtsev,
Artur Yu. Avdizhiyan

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: nikitapimenov13@gmail.com

Abstract

Objectives. Two-dimensional transition metal dichalcogenides (TMDs) are utilized for various optical applications due to the presence in these materials of a direct band gap corresponding to the visible and near-infrared spectral regions. However, a limited set of existing TMDs makes the region of the used spectral range discrete. The most effective way to solve this problem is to use two-dimensional TMD films based on multicomponent alloys, including three or more different chemical elements (while TMDs consist of two). By varying their morphological composition, one can control the value of the band gap and thus their optical absorption spectrum. However, since the band gap in such structures is highly nonlinear as far as their chemical composition is concerned, it can be challenging to select the required concentration in order to achieve uniform absorption. In this regard, the purpose of this work is to theoretically determine the dependence of the band gap of four-component two-dimensional $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ alloys on their morphological composition.

Methods. The calculations were performed within the framework of the density functional theory using the Quantum Espresso software package. Flakes of two-dimensional TMDs alloys were prepared from bulk TMDs crystals by mechanical exfoliation on a Si/SiO₂ substrate. An experimental study of the photoluminescence characteristics was carried out using photoluminescence microscopy-spectroscopy.

Results. In this work, the dependence of the band gap on the morphological composition of two-dimensional $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ alloys was determined. Upon varying the composition of TMDs alloys, it was found that the band gap changes from 1.43 to 1.83 eV. The obtained theoretical results are in qualitative agreement with the experimental data.

Conclusions. The minimum band gap is observed in alloys close to MoSe₂, while alloys close to WS₂ have the maximum band gap value.

Keywords: transition metal dichalcogenides, two-dimensional semiconductors, band structure, band gap, density functional theory

• Submitted: 17.11.2021 • Revised: 24.02.2022 • Accepted: 19.04.2022

For citation: Pimenov N.Yu., Lavrov S.D., Kudryavtsev A.V., Avdizhiyan A.Yu. Modeling of two-dimensional $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{ySe}_{2(1-y)}$ alloy band structure. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):56–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-56-63>**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие Новоселовым и Геймом способа получения графена в 2004 г. [1] вызвало огромный интерес к исследованию различных двумерных материалов с уникальными физическими свойствами. Среди таких материалов можно выделить дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). ДПМ представляют собой материалы с формулой MX_2 , где М – переходный металл (Mo, W и др.), а X – халькоген (S, Se и др.). Атомы металла и халькогена имеют преимущественно ковалентную связь и образуют гексагональную решетку. Объемные кристаллы обладают слоистой структурой со слабыми Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями между слоями [2]. В отличие от графена, который является полуметаллом, двумерные ДПМ обладают запрещенной зоной. Ключевой особенностью таких материалов является сильное изменение конфигурации их зонной структуры при изменении толщины: так объемные кристаллы ДПМ являются непрямозонными полупроводниками, а двумерные – прямозонными [3]. Благодаря прямому переходу, высокой подвижности носителей заряда и ряду других свойств [4] двумерные ДПМ находят применение в качестве материалов для создания фотодетекторов [5], фототранзисторов [6], солнечных элементов [7] и других устройств опто- и наноэлектроники [8].

Варьируя количество слоев, состав, деформацию и другие параметры ДПМ можно менять параметры устройств, сделанных на их основе. Прямозонный переход в двумерных ДПМ способствует эффективному поглощению и генерации света, что важно в оптических приложениях. Важной характеристикой, определяющей оптическое поглощение материала, является ширина запрещенной зоны. В двумерных ДПМ ширина запрещенной зоны составляет порядка 1–2 эВ, что соответствует видимой и ближней инфракрасной областям спектра. Так как количество различных ДПМ весьма ограничено, область используемого спектрального диапазона является дискретной. Одним из способов решения данной проблемы является синтез различных структур, состоящих из более чем двух видов атомов. Благодаря схожей атомной структуре различных ДПМ возможно создание твердых растворов на их основе (например, $\text{MoS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$ или $\text{Mo}_x\text{W}_{x-1}\text{S}_2$) [9]. Помимо этого, много работ посвящено созданию и исследованию

гетероструктур, состоящих из двух слоев ДПМ различного состава (например, MoS_2/WS_2) [10] и «монослоев Януса» (материалов, имеющих формулу MXY , где М – атом переходного металла, который заключен между двумя однородными слоями различных халькогенов X и Y), таких как MoSSe или WSSe [11].

Использование твердых растворов двумерных ДПМ обусловлено тем, что, меняя морфологический состав, можно довольно точно контролировать ширину запрещенной зоны. Это, в свою очередь, позволяет управлять спектром поглощения на всем диапазоне возможных значений. Нелинейный характер зависимости ширины запрещенной зоны от морфологического состава твердого раствора затрудняет подбор необходимой концентрации для достижения требуемых параметров. В связи с этим возникает необходимость в определении данной зависимости.

В настоящее время существует довольно много работ по исследованию трехкомпонентных структур [12, 13], но более сложные структуры остаются слабо изученными. В связи с этим в рамках данной работы был выполнен теоретический расчет зонной структуры двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{ySe}_{2(1-y)}$ при $x, y \in 0-1$ и определена зависимость ширины запрещенной зоны от морфологического состава.

МЕТОДЫ

Все расчеты в данной работе были выполнены из первых принципов (*ab initio*) в рамках теории функционала плотности (ТФП) с обменно-корреляционным функционалом Пердью – Бурке – Эйзернхоффа [14] и ультрамягкими псевдопотенциалами. Расчеты были выполнены в программной среде *Quantum Espresso* [15]. Минимальная кинетическая энергия отсечки была выбрана равной 80 Ry. Размерность k -сетки была выбрана равной $8 \times 8 \times 1$. Генерация особых k -точек в первой зоне Бриллюэна выполнена методом Монкхроста – Пака [16]. Элементарная ячейка монослойного ДПМ содержит в себе 1 атом металла и 2 атома халькогена. Для расчетов была сгенерирована суперячейка, размерностью 2×2 элементарных ячеек и включающая в себя 4 атома металла и 8 атомов халькогенов. Структура суперячейки приведена на рис. 1.

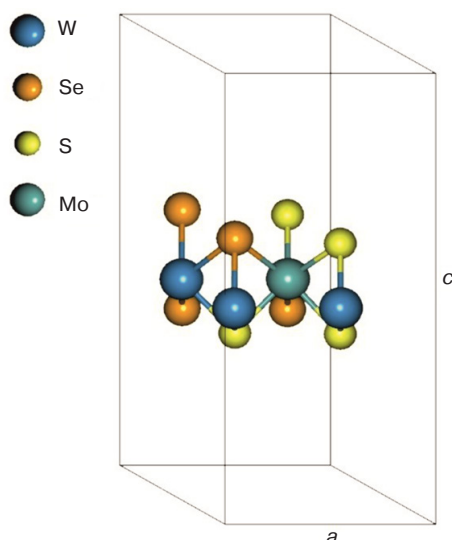


Рис. 1. Структура суперъединицы $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ размерностью 2×2

Для того, чтобы исключить влияние соседних слоев, отношение параметров ячейки c/a было установлено порядка 2.5.

Двумерные кристаллиты твердых растворов ДПМ были изготовлены из объемных кристаллов ДПМ (коммерчески доступные материалы, 6Carbon Technology, Shenzhen, China Шэньчжэнь, Китай)¹ при помощи механической эксфолиации на подложку Si/SiO₂. Исходные образцы представляли собой серию $\text{MoS}_{2x}\text{Se}_{2(x-1)}$ с разной концентрацией халькогена. Параметр x в серии изменялся от 0 до 1 с шагом 0.1–0.2. Толщина созданных двумерных кристаллитов оценивалась при помощи оптической конфокальной микроскопии, что возможно благодаря использованию эффектов интерференции [17].

Экспериментальное исследование фотолуминесцентных характеристик созданных двумерных твердых растворов полупроводников было проведено при помощи фотолуминесцентной микроскопии-спектроскопии. В качестве источника лазерной накачки использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 нм. Далее излучение с помощью объектива фокусировалось на образце, закрепленном на сканирующем столике. Плотность мощности оптического излучения накачки составляла приблизительно 15 мВт/мкм². Для детектирования оптического излучения использовался фотоэлектронный умножитель, сопряженный с оптическим монохроматором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет зонных структур двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ проводился в несколько

¹ URL: <http://www.6carbon.com/index-en.php>, дата обращения 03.08.2021. [URL: <http://www.6carbon.com/index-en.php>. Accessed August 3, 2021.]

этапов. Сначала был проведен расчет двухкомпонентных ДПМ – MoS_2 , WS_2 , MoSe_2 и WSe_2 с использованием соответствующих элементарных ячеек. После чего было проведено сравнение полученных результатов с расчетами, выполненными ранее по схожей методике. На втором этапе был проведен расчет трехкомпонентных ДПМ – $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$, $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$, $\text{MoS}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ и $\text{WS}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ различного морфологического состава. На заключительном этапе был сделан расчет четырехкомпонентных ДПМ $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ и построен общий график зависимости ширины запрещенной зоны от морфологического состава исследуемых структур.

Рассчитанные на первом этапе зонные структуры двумерных MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 и WSe_2 представлены на рис. 2.

Во всех рассчитанных структурах наблюдается прямозонный переход в К точке зоны Бриллюэна. Ширина E_g запрещенной зоны, параметр a элементарной ячейки, полученные в ходе расчетов, и результаты по схожей методике [18] приведены в таблице.

Таблица. Результаты теоретического расчета двухкомпонентных ДПМ

ДПМ	$a_{\text{теор}}, \text{\AA}$	$a, \text{\AA}$ [18]	$E_g \text{ теор}, \text{эВ}$	$E_g, \text{эВ}$ [18]
MoS_2	3.18	3.18	1.69	1.68
MoSe_2	3.32	3.32	1.44	1.45
WS_2	3.19	3.18	1.79	1.82
WSe_2	3.33	3.32	1.55	1.55

Расчет трехкомпонентных твердых растворов ДПМ был проведен для двух случаев: когда меняется концентрация атомов переходных металлов и при изменении концентрации атомов халькогенов. На рис. 3 представлены зависимости ширины E_g запрещенной зоны и параметра a суперъединицы для двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$ и $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ от изменения концентрации переходных металлов в их составе.

В обоих случаях характерно уменьшение ширины запрещенной зоны при преобладании Mo. Также заметно, что для твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$ характерна большая ширина запрещенной зоны, чем для $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$, в среднем на 0.3 эВ. Параметр суперъединицы меняется незначительно (в пределах нескольких сотых $\text{\AA}$) и в среднем равен 6.36 $\text{\AA}$ и 6.64 $\text{\AA}$ для $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$ и $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$ соответственно.

Аналогичные результаты расчетов для зависимостей $\text{MoS}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$ и $\text{WS}_{2y}\text{Se}_{2(1-y)}$, в которых меняется отношение халькогенов, приведены на рис. 4.

С увеличением концентрации S в составе характерен рост ширины запрещенной зоны для обоих твердых растворов. При этом параметр суперъединицы

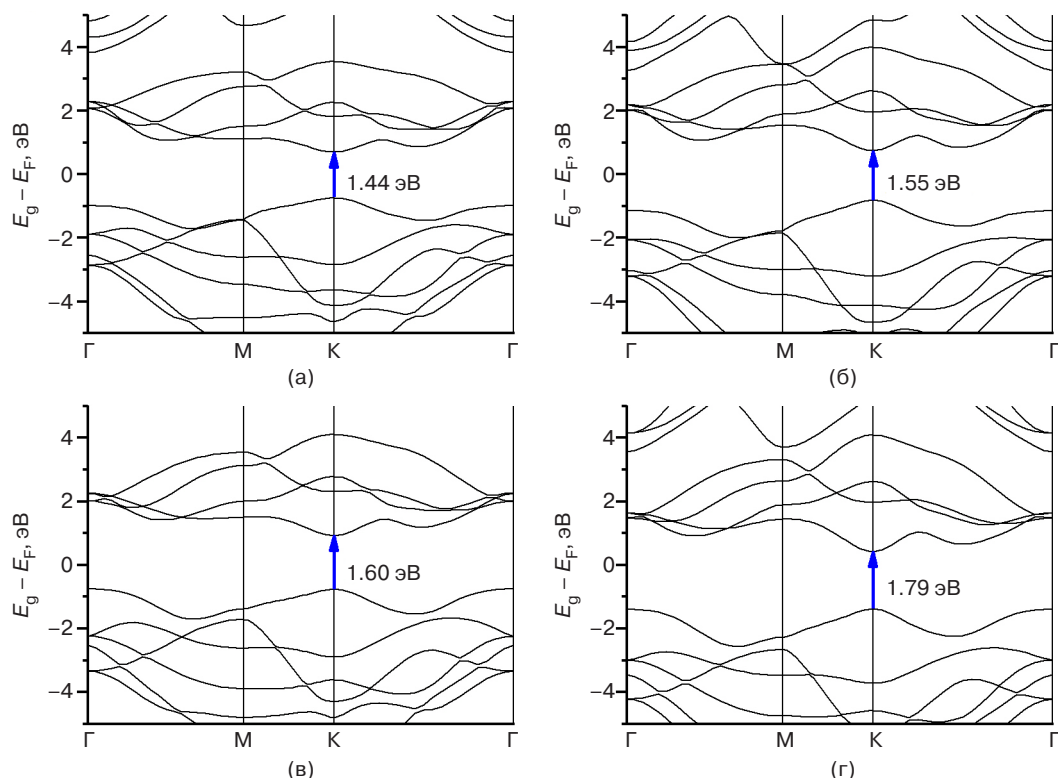


Рис. 2. Рассчитанные зонные структуры (а) MoSe_2 , (б) WSe_2 , (в) MoS_2 и (г) WSe_2 . Γ , M, K – характерные точки зоны Бриллюэна

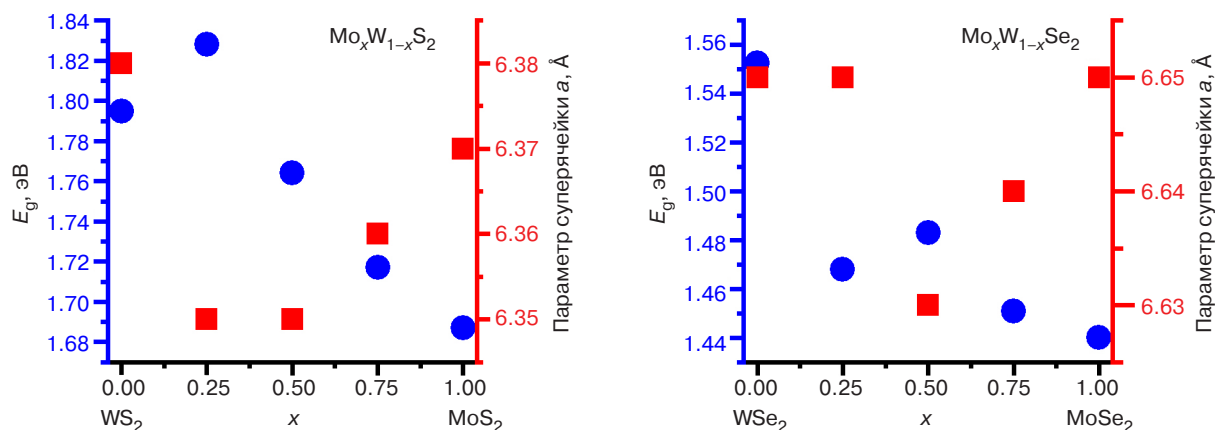


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны (круг) и параметра суперрешетки (квадрат) от соотношения переходных металлов для $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$ и $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{Se}_2$, где x – относительная концентрация атомов Mo в составе

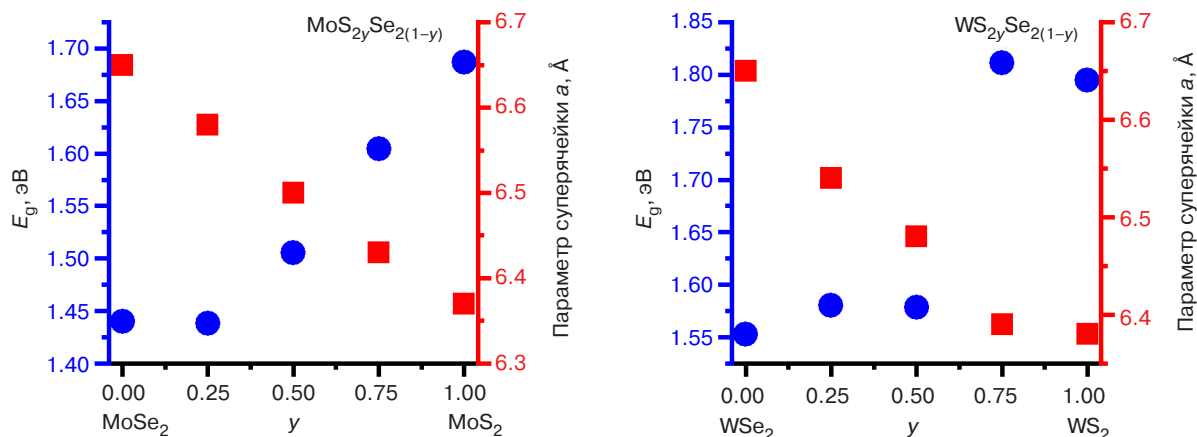


Рис. 4. Зависимость ширины запрещенной зоны (круг) и параметра суперрешетки (квадрат) от соотношения халькогенов для $\text{MoS}_2\text{Se}_{2(1-y)}$ и $\text{WS}_2\text{Se}_{2(1-y)}$, где y – относительная концентрация атомов S в составе

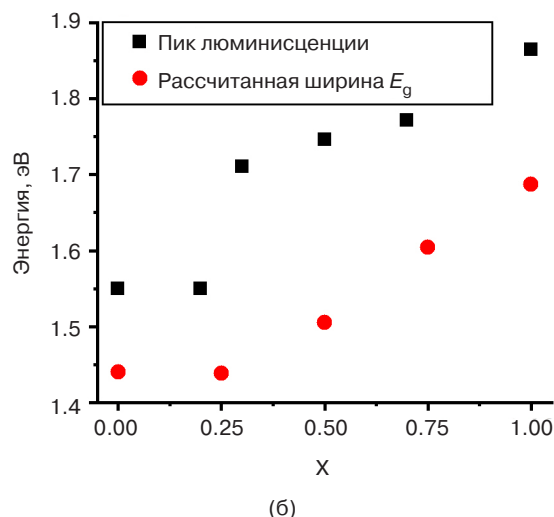
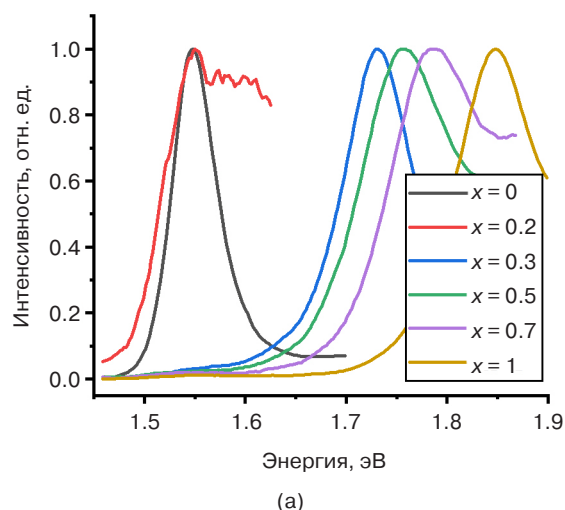


Рис. 5. (а) Спектры люминесценции твердых растворов двумерных кристаллитов ДПМ $\text{MoS}_{2-x}\text{Se}_{2(x-1)}$; (б) сравнение теоретически рассчитанной ширины запрещенной зоны $\text{MoS}_{2-x}\text{Se}_{2(x-1)}$ и положения максимума их пика люминесценции. X – значение x в $\text{MoS}_{2-x}\text{Se}_{2(x-1)}$

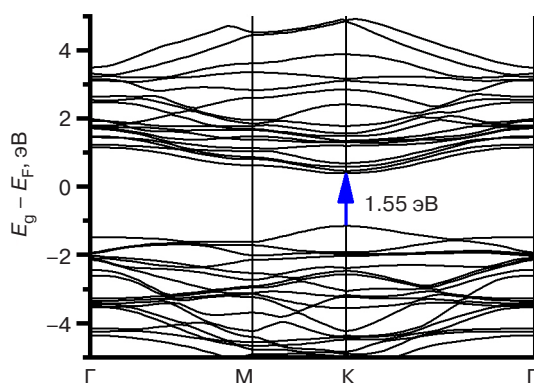


Рис. 6. Рассчитанная зонная структура твердого раствора $\text{Mo}_{0.25}\text{W}_{0.75}\text{S}_{0.5}\text{Se}_{1.5}$

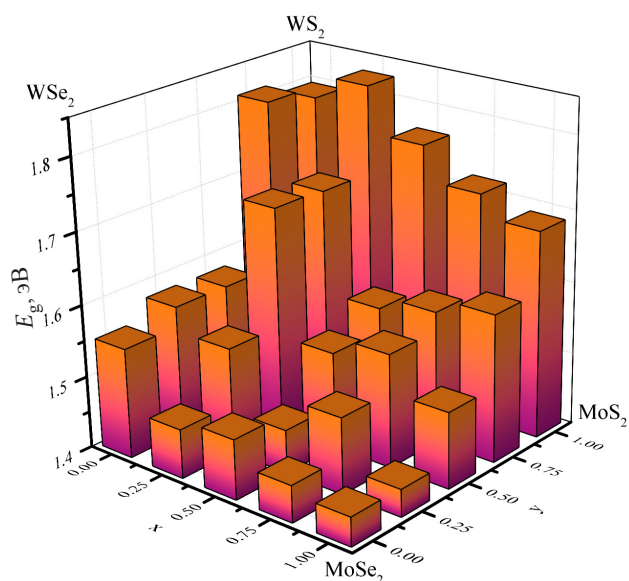


Рис. 7. Зависимость ширины запрещенной зоны от морфологического состава двумерных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{Se}_{2(1-y)}$, где x – относительная концентрация атомов Mo, а y – относительная концентрация атомов S в составе

уменьшается при преобладании S в составе (примерно на 0.3 Å при переходе от Se к S).

Для экспериментальной проверки полученных теоретических результатов были получены спектры люминесценции созданных при помощи механической эксфолиации двумерных твердых растворов ДПМ. Полученные спектры люминесценции представлены на рис. 5а. Видно, что все спектры обладают характерным максимумом в диапазоне от 1.55 до 1.85 эВ. Положения максимумов для каждого из исследованных составов нанесены вместе с полученными теоретическими результатами ширины запрещенной зоны на рис. 5б. Из представленных результатов видно, что теоретические и экспериментальные значения при всех концентрациях ДПМ отличаются на фиксированное значение, равное приблизительно 0.2 эВ. Это связано с тем, что ТФП систематически недооценивает ширину запрещенной зоны, в результате чего данные, полученные в результате расчетов, несколько меньше, чем экспериментальные [19].

Последним этапом был расчет четырехкомпонентных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{Se}_{2(1-y)}$ различного состава. По полученным зонным структурам были определены значения ширины запрещенной зоны. Пример рассчитанной зонной структуры для твердого раствора $\text{Mo}_{0.25}\text{W}_{0.75}\text{S}_{0.5}\text{Se}_{1.5}$ приведен на рис. 6.

Во всех рассчитанных четырехкомпонентных твердых растворах $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{Se}_{2(1-y)}$, как и в двухкомпонентных, наблюдается прямозонный переход в К точке зоны Бриллюэна. На рис. 7 приведена зависимость ширины запрещенной зоны от морфологического состава твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{Se}_{2(1-y)}$ для $x, y \in 0-1$.

Результаты показывают, что в двумерных твердых растворах $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{Se}_{2(1-y)}$ различного морфологического состава можно варьировать ширину

запрещенной зоны в пределах порядка от 1.83 эВ до 1.43 эВ. При этом минимальные значения запрещенной зоны имеют структуры, близкие по своему морфологическому составу к монослою MoSe_2 , а максимальные – к монослою WS_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был проведен теоретический расчет зонной структуры монослойных твердых растворов $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{ySe}_{2(1-y)}$. Определено, что все рассчитанные структуры являются прямыми полупроводниками с переходом в К точке зоны Бриллюэна. Показано, что параметр суперъядейки слабо зависит от изменения концентрации переходных металлов (Мо и W) и в большей степени определяется концентрацией халькогенов (уменьшается при переходе от Se к S). В двумерных твердых растворах $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{ySe}_{2(1-y)}$ можно получать структуры с шириной запрещенной зоны в пределах от 1.43 эВ (для твердых растворов близких по составу к MoSe_2) до 1.83 эВ (для твердых растворов близких по составу к WS_2). Сравнение результатов теоретического расчета с экспериментальными данными показало качественное совпадение зависимостей. При этом важно учитывать, что ТФП систематически

недооценивает ширину запрещенной зоны примерно на 0.2 эВ. Дальнейшее улучшение полученных результатов подразумевает увеличение размерности суперъядейки, что позволит получить значения запрещенной зоны для большего набора структур $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2\text{ySe}_{2(1-y)}$ различного морфологического состава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-10165). Экспериментальные исследования были выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Вклад авторов

Н.Ю. Пименов и **А.В. Кудрявцев** – теоретический расчет зонной структуры исследуемых твердых растворов.

С.Д. Лавров и **А.Ю. Авдизиян** – экспериментальное исследование фотолюминесцентных характеристик твердых растворов.

Authors' contributions

N.Yu. Pimenov and **A.V. Kudryavtsev** – zone structure simulation of the alloys under study.

S.D. Lavrov and **A.Yu. Avdizhiyan** – experimental study of photoluminescent characteristics of alloys.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004;306(5696):666–669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
2. Чернозатонский Л.А., Артюх А.А. Квазидвумерные дихалькогениды переходных металлов: структура, синтез, свойства и применение. *Успехи физических наук*. 2018;188(1): 3–30. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038065> [Chernozatonskii L.A., Artyukh A.A. Quasi-two-dimensional transition metal dichalcogenides: structure, synthesis, properties, and applications. *Phys.-Usp.* 2018;61(1):2–28. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.02.038065>]
3. Yun W.S., Han S.W., Hong S.C., Kim I.G., Lee J.D. Thickness and strain effects on electronic structures of transition metal dichalcogenides: 2H-MX₂ semiconductors (M = Mo, W; X = S, Se, Te). *Phys. Rev. B*. 2012;85(3):033305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.033305>
4. Huo N., Yang Y., Wu Y.-N., Zhang X.-G., Pantelides S.T., Konstantatos G. High carrier mobility in monolayer CVD-grown MoS_2 through phonon suppression. *Nanoscale*. 2018;10(31):15071–15077. <https://doi.org/10.1039/C8NR04416C>
5. Taffelli A., Dirè S., Quaranta A., Panzeri L. MoS_2 based photodetectors: a review. *Sensors*. 2021;21(8):2758. <https://doi.org/10.3390/s21082758>
6. Shin G. H., Park C., Lee H.J., Jin H.J., Choi S.-Y. Ultrasensitive phototransistor based on WSe_2 - MoS_2 van der Waals heterojunction. *Nano Lett.* 2020;20(8): 5741–5748. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01460>
7. Wang T., Zheng F., Tang G., Cao J., You P., Zhao J., Yan F. 2D WSe_2 flakes for synergistic modulation of grain growth and charge transfer in tin-based perovskite solar cells. *Adv. Sci.* 2021;8(11):2004315. <https://doi.org/10.1002/advs.202004315>
8. Choi W., Choudhary N., Han G.H., Park J., Akinwande D., Lee Y.H. Recent development of two-dimensional transition metal dichalcogenides and their applications. *Mater. Today*. 2017;20(3):116–130. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2016.10.002>
9. Su S.-H., Hsu W.-T., Hsu C.-L., Chen C.-H., Chiu M.-H., Lin Y.-C., Chang W.-H., Suenaga K., He J.-H., Li L.-J. Controllable synthesis of band-gap-tunable and monolayer transition-metal dichalcogenide alloys. *Front. Energy Res.* 2014;2:27. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00027>
10. Li M.-Y., Chen C.-H., Shi Y., Li L.-J. Heterostructures based on two-dimensional layered materials and their potential applications. *Mater. Today*. 2016;19(6): 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.11.003>
11. Petric M.M., Kremser M., Barbone M., Qin Y., Sayyad Y., Shen Y., Tongay S., Finley J.J., Botello-Méndez A.R., Müller K. Raman spectrum of Janus transition metal dichalcogenide monolayers WSe_2 and MoSe_2 . *Phys. Rev. B*. 2021;103(3):035414. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.035414>

12. Ernandes C., Khalil L., Almabrouk H., Pierucci D., Zheng B., Avila J., Dudin P., Chaste J., Oehler F., Pala M., Bisti F., Brulé T., Lhuillier E., Pan A., Ouerghi A. Indirect to direct band gap crossover in two-dimensional $\text{WS}_{2(1-x)}\text{Se}_{2x}$ alloys. *npj 2D Mater. Appl.* 2021;5(1):7. <https://doi.org/10.1038/s41699-020-00187-9>
13. Wang Z., Sun J., Wang H., Lei Y., Xie Y., Wang G., Zhao Y., Li X., Xu H., Yang X., Feng L., Ma X. 2H/1T' phase $\text{WS}_{2(1-x)}\text{Te}_{2x}$ alloys grown by chemical vapor deposition with tunable band structures. *Appl. Surf. Sci.* 2020;504:144371. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144371>
14. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Phys. Rev. Lett.* 1996;77(18):3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
15. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., Ceresoli D., Chiarotti G.L., Cococcioni M., Dabo I., Corso A.D., Gironcoli S., Fabris S., Fratesi G., Gebauer R., Gerstmann U., Gougousis C., Kokalj A., Lazzeri M., Martin-Samos L., Marzari N., Mauri F., Mazzarello R., Paolini S., Pasquarello A., Paulatto L., Sbraccia C., Scandolo S., Sclauzero G., Seitsonen A.P., Smogunov A., Umari P., Wentzcovitch R.M. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *J. Phys.: Condens. Matter.* 2009;21(39):395502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>
16. Monkhorst H.J., Pack J.D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B.* 1976;13(12):5188–5192. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.5188>
17. Li S.-L., Miyazaki H., Song H., Kuramochi H., Nakaharai S., Tsukagoshi K. Quantitative Raman spectrum and reliable thickness identification for atomic layers on insulating substrates. *ACS Nano.* 2012;6(8):7381–7388. <https://doi.org/10.1021/nn3025173>
18. Zhuang H.L., Henning R.G. Computational search for single-layer transition-metal dichalcogenide photocatalysts. *J. Phys. Chem. C.* 2013;117(40):20440–20445. <https://doi.org/10.1021/jp405808a>
19. Huang J., Wang W., Fu Q., Yang L., Zhang K., Zhang J., Xiang B. Stable electrical performance observed in large-scale monolayer $\text{WSe}_{2(1-x)}\text{S}_{2x}$ with tunable band gap. *Nanotechnology.* 2016;27(13):13LT01. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/13/13LT01>

Об авторах

Пименов Никита Юрьевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nikitapimenov13@gmail.com. ResearcherID ABB-2465-2021, <https://orcid.org/0000-0001-9882-8647>

Лавров Сергей Дмитриевич, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sdlavrov@mail.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

Кудрявцев Андрей Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, научный сотрудник кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kudryavcev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 55219889700, ResearcherID O-1457-2016, <https://orcid.org/0000-0002-2126-7404>

Авдизиян Артур Юрьевич, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: avdizhiyan@mirea.ru. Scopus Author ID 57200646355, ResearcherID C-2190-2018, <https://orcid.org/0000-0003-1766-5482>

About the authors

Nikita Yu. Pimenov, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nikitapimenov13@gmail.com. ResearcherID ABB-2465-2021, <https://orcid.org/0000-0001-9882-8647>

Sergey D. Lavrov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sdlavrov@mail.ru. Scopus Author ID 55453548100, ResearcherID G-2912-2016, <https://orcid.org/0000-0002-9432-860X>

Andrey V. Kudryavtsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kudryavcev_a@mirea.ru. Scopus Author ID 55219889700, ResearcherID O-1457-2016, <https://orcid.org/0000-0002-2126-7404>

Artur Yu. Avdizhiyan, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Junior Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: avdizhiyan@mirea.ru. Scopus Author ID 57200646355, ResearcherID C-2190-2018, <https://orcid.org/0000-0003-1766-5482>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 537.6
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца

Ф.А. Федулов[®],
Д.В. Савельев,
Д.В. Чашин,
В.И. Шишкин,
Ю.К. Фетисов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: ostsilograf@ya.ru

Резюме

Цели. Актуальной задачей при создании магнитоэлектрических (МЭ) устройств на основе композитных гетероструктур ферромагнетик-пьезоэлектрик является уменьшение их размеров, что позволит повысить рабочие частоты устройств и интегрировать их в современную электронику. Цель работы – исследование влияния размеров на характеристики МЭ эффектов в полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца, изготовленных методом электролитического осаждения.

Методы. Для изготовления образцов использовали диски цирконата-титаната свинца с Ag-электродами. На одну поверхность диска электролитически наносили слой Ni. Исследовали резонансную частоту МЭ эффекта, коэффициент МЭ преобразования на этой частоте и величину оптимального магнитного поля смещения для полученных образцов.

Результаты. Показано, что уменьшение размера в плоскости полосковых структур до ~1 мм приводит к росту частоты резонансного МЭ эффекта до ~1 МГц и одновременно к снижению эффективности МЭ преобразования. МЭ коэффициент для периодических гетероструктур с шириной Ni-полосок ~100 мкм и расстоянием между ними 20–100 мкм составляет ~1 В/(Э · см). Показано, что при увеличении угла φ между направлением постоянного поля H и осью Ni-полосок от 0° до 90° величина оптимального поля H_m возрастает в ~2.5 раза, а максимальная амплитуда напряжения $u_{\max}(H_m)$ падает в 4 раза.

Выводы. В периодических структурах частота резонансного МЭ эффекта определяется размером подложки и может составлять единицы кГц, а эффективность преобразования полей зависит от ширины Ni-полосок и расстояния между ними. Обнаружена и объяснена анизотропия характеристик МЭ эффектов в исследованных гетероструктурах, возникающая из-за эффектов размагничивания. Анизотропия МЭ эффекта в периодических гетероструктурах может быть использована для создания датчиков постоянных магнитных полей, чувствительных к ориентации поля.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, пьезоэлектрический эффект, анизотропия, датчик магнитного поля

• Поступила: 24.11.2021 • Доработана: 18.02.2022 • Принята к опубликованию: 18.04.2022

Для цитирования: Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Чашин Д.В., Шишкин В.И., Фетисов Ю.К. Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):64–73. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Magnetoelectric effects in stripe- and periodic heterostructures based on nickel–lead zirconate titanate bilayers

Fedor A. Fedulov[@],
Dmitriy V. Saveliev,
Dmitriy V. Chashin,
Vladimir I. Shishkin,
Yuri K. Fetisov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: ostsilograf@ya.ru

Abstract

Objectives. A topical task in the design of magnetoelectric (ME) devices based on composite ferromagnetic–piezoelectric heterostructures involves reducing their dimensions to increase their operating frequencies and optimize their integration in modern electronics. The study set out to investigate the influence of in-plane dimensions on the characteristics of ME effects in stripe and periodic nickel–lead zirconate titanate heterostructures manufactured via electrolytic deposition.

Methods. Lead zirconate titanate disks with Ag-electrodes were used for manufacturing the ME heterostructures; Ni was deposited on one Ag-electrode only.

Results. While a reduction in stripe size leads to an increase in the frequency of the resonant ME effect, it is followed by a decrease in ME conversion efficiency. The ME coefficient for the periodic heterostructures is about $\sim 1 \text{ V}/(\text{Oe}\cdot\text{cm})$. By increasing the angle between the magnetic field H and the Ni-stripe axis from 0° to 90° , a 2.5-fold increase in the optimal field H_m and a 4-fold drop in the maximum amplitude of ME voltage $u_{\max}(H_m)$ was achieved.

Conclusions. In periodic heterostructures, the frequency of the resonant ME effect is determined by the substrate's size, while ME conversion efficiency depends on the width of the Ni stripes and the distance between them. The observed anisotropy of the ME effects in the investigated heterostructures is explained in terms of demagnetization effects. In the future, the anisotropic ME effect in the periodic heterostructures could be used to develop magnetic field sensors that are sensitive to field orientation.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetostriction, piezoelectric effect, anisotropy, magnetic field sensor

• Submitted: 24.11.2021 • Revised: 18.02.2022 • Accepted: 18.04.2022

For citation: Fedulov F.A., Saveliev D.V., Chashin D.V., Shishkin V.I., Fetisov Y.K. Magnetoelectric effects in stripe- and periodic heterostructures based on nickel–lead zirconate titanate bilayers. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):64–73. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание ученых привлекает изучение магнитоэлектрических (МЭ) эффектов в композитных гетероструктурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, и разработка устройств на их основе. Созданы прототипы высокочувствительных МЭ датчиков постоянных и переменных магнитных полей, электрически управляемых устройств обработки радиосигналов, автономных источников электрической энергии [1–3]. Установлено, что МЭ эффекты в ФМ-ПЭ структурах возникают в результате комбинации магнитострикции ФМ слоя и пьезоэлектричества в ПЭ слое из-за механической связи между слоями [4] и проявляются в генерации структурой переменного электрического напряжения u под действием переменного магнитного поля h (прямой эффект) или изменении намагниченности структуры m под действием переменного электрического поля e (обратный эффект). Показано, что эффективность МЭ преобразования полей возрастает на ~ 2 порядка при совпадении частоты возбуждающего поля с частотой акустического резонанса структуры [5]. В настоящее время актуальными задачами являются уменьшение размеров МЭ элементов, что позволит повысить рабочие частоты устройств и интегрировать их в современную электронику и микросистемную технику, а также изучение взаимодействия МЭ элементов в составе пространственно-распределенных структур, которые предполагается использовать для измерений магнитных полей в биологии и медицине [6]. Ранее было экспериментально показано, что уменьшение размеров ФМ-ПЭ гетероструктур в плоскости до ~ 0.5 – 1 см приводит к повышению частоты акустического резонанса структуры f_0 и снижению амплитуды генерируемого МЭ напряжения $u(f_0)$ на этой частоте [7]. Кроме того, из-за эффектов размагничивания возрастает оптимальное магнитное поле смещения H_m , которое необходимо дополнительно прикладывать к структуре [8]. При использовании гетероструктур в виде длинных полосок анизотропия формы приводит к возникновению сильной анизотропии [9], что может найти применение для разработки датчиков постоянных магнитных полей, чувствительных к направлению поля [10]. Исследований характеристик МЭ эффектов в периодических структурах,

содержащих набор МЭ элементов, насколько известно авторам, до настоящего времени не проводили.

Целью данной работы явилось изучение характеристик МЭ эффектов в полосковых и периодических гетероструктурах с ФМ слоем из никеля (Ni) и ПЭ слоем из пьезокерамики цирконата-титаната свинца (ЦТС) миллиметровых и субмиллиметровых размеров в плоскости. Выбор материалов обусловлен возможностью использования технологии электроосаждения толстых слоев Ni, который обладает достаточно высокой магнитострикцией в малых магнитных полях. В первой части работы описан метод изготовления Ni-ЦТС гетероструктур в виде отдельных полосок и метод изготовления периодических структур в виде решетки из Ni-полосок на поверхности ЦТС-подложки, а также методики измерений. Вторая часть содержит результаты экспериментальных исследований МЭ характеристик отдельных Ni-ЦТС полосок с линейными размерами ~ 1 – 15 мм. В третьей части работы приведены МЭ характеристики Ni-ЦТС гетероструктур с Ni-решетками с периодами 0.12 – 0.2 мм, включая частотные, полевые и амплитудные зависимости. Развита теория, объясняющая возникновение сильной анизотропии МЭ эффекта в периодических структурах и учитывающая магнитное взаимодействие между отдельными полосками решетки. В заключении сформулированы основные выводы и рекомендации работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для экспериментального исследования влияния линейных размеров МЭ структуры на характеристики прямого резонансного МЭ эффекта были изготовлены структуры двух типов. Первый тип представлял собой двухслойные композитные гетероструктуры со слоями из пьезоэлектрической керамики цирконата-титаната свинца $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$ (ЦТС) и Ni, схематический вид и фотографии которых представлен на рис. 1а и 1б соответственно. Пьезокерамика ЦТС была выбрана как распространенный, изотропный и легко обрабатываемый материал. Пьезомодуль керамики равнялся $d_{31} \approx 175$ пКл/м, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 1700$. Слои ферромагнитного Ni обладают высокой магнитострикцией $\lambda_s = -30 \cdot 10^{-6}$ и насыщаются в малых магнитных полях $H_s \approx 1$ кЭ. Для изготовления образцов использовали коммерчески доступные ЦТС-диски диаметром 25 мм и толщиной $a_p = 200$ мкм

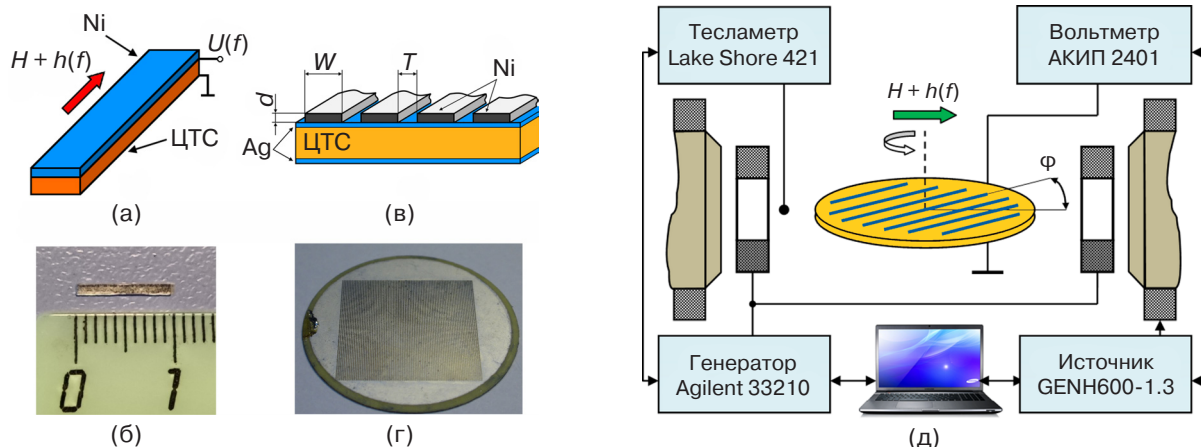


Рис. 1. Внешний вид и схематическое изображение исследуемых композитных Ni-ЦТС гетероструктур (а) – (г) и блок-схема измерительной установки (д)

с Ag-электродами толщиной по ~ 2 мкм (НИИ Элпа, Москва, Россия). На одну поверхность диска методом электролитического осаждения наносили слой Ni толщиной $a_m \approx 10$ мкм из водного раствора солей NiCl_2 и NiSO_4 [11]. Скорость осаждения Ni при плотности тока 1 A/cm^2 составляла 1 мкм/мин. Из центральной части диска вырезали полоски шириной по 1 мм. Затем из полосок были изготовлены структуры длиной $L = 1.2, 2, 4, 6, 8, 10, 15$ и 23 мм. Метод электролитического осаждения позволил изготовить монокристаллические структуры с изотропными в плоскости свойствами и хорошей механической связью между слоями.

МЭ структуры второго типа представляли собой решетки из параллельных Ni-полосок, нанесенные на поверхность ЦТС-подложки. В качестве ЦТС-подложки использовали те же диски диаметром 25 мм и толщиной $a_p = 200$ мкм с Ag-электродами толщиной 2 мкм на поверхностях. Решетку из Ni-полосок изготавливали следующим методом. Оба электрода ЦТС-диска покрывали слоем положительного фоторезиста марки CRC Kontakt Chemie Positiv 20/200 (Бельгия) толщиной ~ 2 мкм. Одну из поверхностей экспонировали через фотомаску размером $16 \text{ мм} \times 16 \text{ мм}$ в виде параллельных полосок ультрафиолетовым излучением в течение 60 с. Затем удаляли засвеченные участки фоторезиста водным раствором гидроксида натрия с концентрацией 6 г/л. После этого на свободные участки Ag-электрода электролитически осаждали слой Ni толщиной $a_m \approx 10$ мкм. Поперечное сечение изготовленных образцов схематически изображено на рис. 1в, а внешний вид одного из образцов – на рис. 1г. Таким методом были изготовлены несколько структур с решеткой из Ni-полосок шириной $w = 100$ мкм и расстоянием между полосками $T = 20, 50$ и 100 мкм. Кроме того, для сравнения был изготовлен образец, одна из поверхностей которого была покрыта сплошным слоем ($T = 0$) Ni толщиной $a_m \approx 10$ мкм. Измеренная на этом образце намагниченность насыщения Ni составляла

$M_s = 5900 \text{ Гс}$, а магнитострикция насыщения достигала $\lambda_s = -30 \cdot 10^{-6}$ в поле насыщения $H_s \approx 1 \text{ кЭ}$.

Блок-схема установки для исследования МЭ эффектов показана на рис. 1д. Образцы помещали между катушками Гельмгольца радиусом 15 см, подключенными к генератору Agilent 33210A (Agilent Technologies, США). Катушки генерировали переменное возбуждающее магнитное поле $h \cos(2\pi ft)$ с частотой $f = 1 \text{ кГц} - 2 \text{ МГц}$ и амплитудой до $h = 4 \text{ Э}$. Постоянное магнитное поле $H = 0 - 2 \text{ кЭ}$ создавали с помощью электромагнита с диаметром полюсов 50 мм, подключенного к блоку питания TDK GENH600-1.3 (TDK-Lambda Corporation, Германия). Поле H измеряли с помощью тесламетра Lake Shore 421 (Lake Shore Cryotronics, Вествил, Огайо, США). Поля h и H были приложены в плоскости структуры и параллельно друг другу. При исследовании анизотропии МЭ эффекта гетероструктуру с Ni-решеткой вращали вокруг вертикальной оси, изменяя угол ϕ между полями и осью Ni-полосок. Напряжение u , генерируемое вследствие МЭ эффекта между электродами ЦТС-диска, измеряли с помощью вольтметра АКПП 2401 с входным сопротивлением 10 МΩ. Регистрировали зависимости МЭ напряжения от частоты возбуждающего поля f и напряженности поля смещения H при разных ориентациях структуры (угол ϕ). Установка работала в автоматическом режиме под управлением специализированной программы в среде LabVIEW¹.

¹ Среда создания приложений для задач сбора, обработки, визуализации информации, полученной от приборов, лабораторных установок, управления технологическими процессами и устройствами. Разработана компанией National Instruments, США. URL: <https://www.ni.com/>, дата обращения: 22.11.2021. [The environment for creating applications for the collection, processing, and visualization of information received from instruments, laboratory facilities, process control and devices, was developed by National Instruments, USA. <https://www.ni.com/>. Accessed November 22, 2021.]

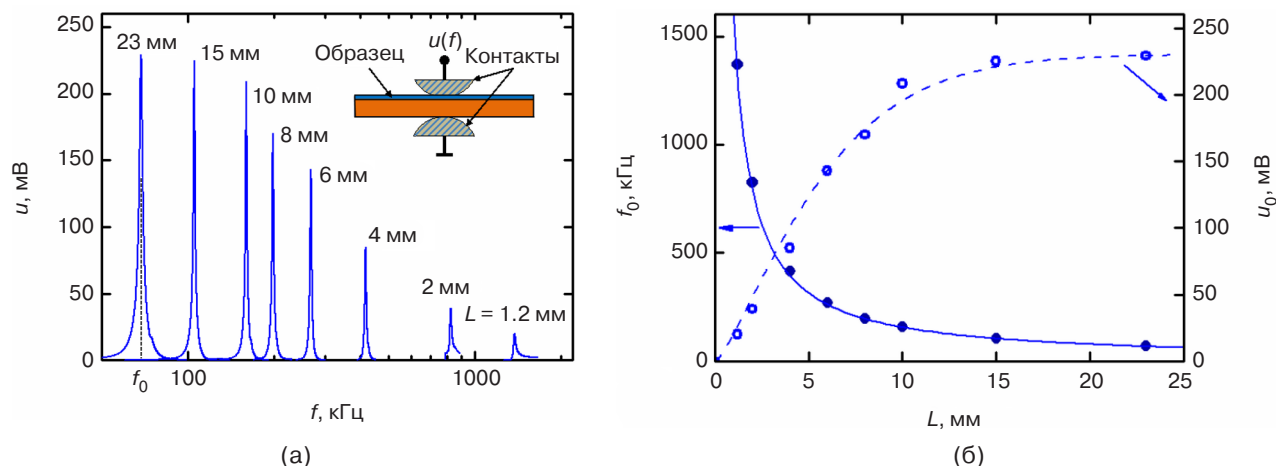


Рис. 2. (а) зависимости амплитуды МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего магнитного поля при амплитуде поля $h = 1.3$ Э для Ni-ЦТС полосок разной длины L . На вставке схематически изображен метод крепления образцов; (б) зависимости резонансной частоты f_0 и напряжения u_0 , генерируемого на частоте f_0 , от длины Ni-ЦТС полоски L . Точки – экспериментальные данные, сплошная линия – расчет по формуле (1), штриховая линия – аппроксимация

Магнитострикцию ФМ слоя структуры измеряли с помощью тензодатчика, наклеенного на поверхность пленки Ni, а кривые намагничивания пленки Ni – с помощью вибрационного магнетометра Lake Shore 7407 (Lake Shore Cryotronics, Вествил, Огайо, США).

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПОЛОСКАХ Ni-ЦТС

На первом этапе был исследован линейный МЭ эффект в двухслойных Ni-ЦТС гетероструктурах в виде полосок разной длины L . На рис. 2 приведены измеренные зависимости амплитуды МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего магнитного поля с амплитудой $h = 1.3$ Э для структур различной L . Для каждого образца измерения проводили в оптимальном постоянном поле H_m , направленном вдоль оси полоски, при котором МЭ преобразование наиболее эффективно. Видно, что с уменьшением L от 23 мм до 1.2 мм резонансная частота f_0 увеличивалась от 68.7 кГц до 1380 кГц, при этом амплитуда сигнала на резонансной частоте падала в ~ 12 раз. Добротность резонансов $Q = f_0/\Delta f$ (где Δf – полоса пропускания по уровню 0.7) составляла $Q \approx 100$ для структур с $L = 4$ –23 мм и затем падала до $Q \approx 67$ и $Q \approx 150$ при уменьшении L до 2 мм и 1.2 мм соответственно. На рис. 2б представлена зависимость резонансной частоты f_0 и МЭ напряжения на данной частоте u_0 от длины структуры L . Для образца длиной $L = 1.2$ мм резонансная частота $f_0 = 1380$ кГц почти в 5 раз выше, чем для структуры длиной 5 мм, описанной в [12]. Амплитуда МЭ напряжения оставалась постоянной $u_0 \approx 230$ мВ для структур длиной $L = 25$ –10 мм, а затем примерно линейно падала до $u_0 \approx 19$ мВ при уменьшении L до 1.2 мм.

На рис. 3 изображены зависимости МЭ напряжения u_0 от постоянного магнитного поля H для Ni-ЦТС полосок разной длины L . Форма зависимостей типична для линейного МЭ эффекта: на начальном участке u_0 линейно возрастает с увеличением H , затем достигает максимума при H_m , своем для каждого образца, и плавно спадает до нуля при насыщении ФМ слоя. С уменьшением длины полоски поле H_m смещалось в область больших полей, а амплитуда напряжения u_0 при H_m падала в ~ 12 раз.

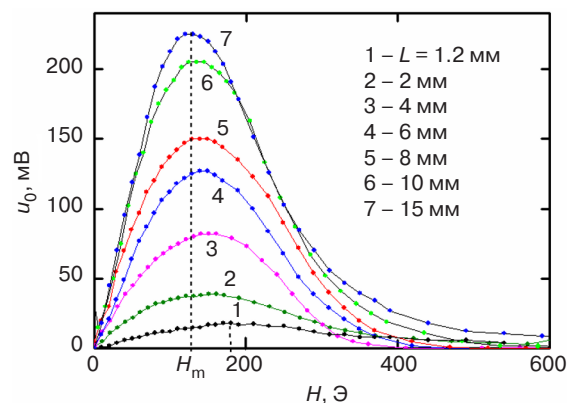


Рис. 3. Зависимости МЭ напряжения u_0 от постоянного магнитного поля H при $h = 1.3$ Э для структур различной длины L . Поле H_m показано только для полоски длиной 15 мм

Наиболее важными характеристиками МЭ эффекта в гетероструктурах являются резонансная частота f_0 , коэффициент МЭ преобразования на этой частоте $\alpha_E = u(f_0)/(a_p h)$ и величина оптимального магнитного поля смещения H_m . Частоту резонанса для исследуемых структур можно оценить по формуле для частоты основной моды акустических колебаний свободного стержня $f_0 = (1/2L)\sqrt{Y/\rho}$ [13]. Эффективные

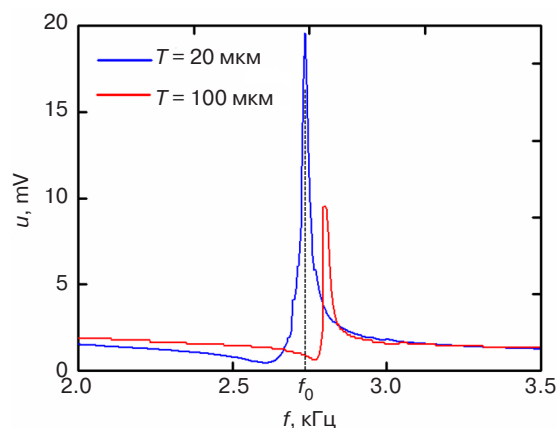


Рис. 4. Зависимость МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего поля для периодических Ni-ЦТС гетероструктур с расстоянием между Ni-полосками 20 мкм и 100 мкм при поле $H = 90$ Э, направленном вдоль Ni-полосок

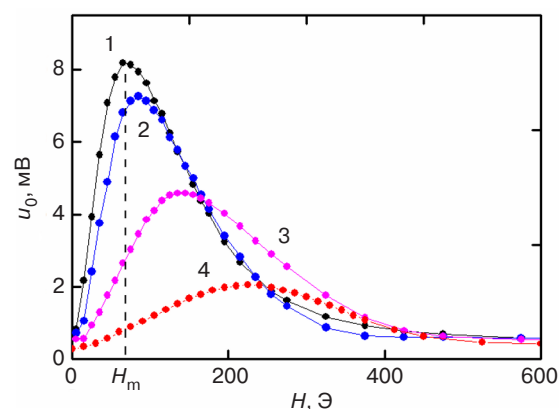


Рис. 5. Зависимость напряжения u_0 от поля H для периодической Ni-ЦТС структуры с $T = 100$ мкм при разных ориентациях поля H : 1 – $\varphi = 0^\circ$, 2 – 30° , 3 – 60° , 4 – 90°

значения модуля Юнга Y и плотности ρ для Ni-ЦТС структуры с двумя Ag-электродами находятся, как $Y = \sum Y_k a_k / \sum a_k$ и $\rho = \sum \rho_k a_k / \sum a_k$, где Y_k , ρ_k и a_k – модуль Юнга, плотность и толщина соответствующего слоя структуры соответственно. Подставляя в формулу значения параметров слоев ($Y_m = 21.5 \cdot 10^{10}$ Н/м², $Y_p = 7 \cdot 10^{10}$ Н/м², $Y_{Ag} = 7.9 \cdot 10^{10}$ Н/м²; $\rho_m = 8.9 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_p = 7.7 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{Ag} = 10.5 \cdot 10^3$ кг/м³; $a_m = 10$ мкм, $a_p = 200$ мкм, $a_{Ag} = 2$ мкм), получаем зависимость частоты резонанса от длины образца $f_0 = 1570/L$ кГц, где L выражено в миллиметрах. Рассчитанная зависимость, изображенная на рис. 2б сплошной линией, хорошо описывает данные измерений. Отметим, что частота f_0 незначительно изменялась (<1%) при перестройке магнитного поля H из-за изменения модуля Юнга ФМ слоя структуры [14]. Максимальная величина МЭ коэффициента для Ni-ЦТС полосок длиной 15 мм составляла $\alpha_E \approx 8.8$ В/(Э · см). Увеличение оптимального поля H_m от ~ 120 Э до ~ 180 Э при уменьшении длины гетероструктуры от 15 мм до 1.2 мм объясняется эффектом размагничивания [2]. Падение амплитуды МЭ напряжения с уменьшением длины L (и повышением частоты f_0) структуры обусловлено, в основном, ростом потерь в ЦТС слое из-за увеличения частоты резонанса. К падению напряжения может приводить также уменьшение акустической добротности Q и пьезомодуля d_{31} ЦТС-слоя с ростом частоты резонанса.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Ni-ЦТС

На втором этапе были исследованы характеристики МЭ эффекта в периодических гетероструктурах с Ni-решетками. На рис. 4 в качестве примера

показаны зависимости МЭ напряжения u от частоты f возбуждающего поля для структур с расстоянием между Ni-полосками $T = 20$ мкм и $T = 100$ мкм при поле $h = 1$ Э и постоянном поле $H = 90$ Э, направленном вдоль Ni-полосок. Резонансный пик вблизи частоты $f_0 \approx 2.74$ кГц с добротностью $Q \approx 150$ по уровню 0.7 соответствует, как показано далее, возбуждению низшей моды изгибных колебаний структуры. Видно, что высота пика u_0 уменьшается в несколько раз, а частота f_0 незначительно растет с увеличением расстояния между Ni-полосками. Величина МЭ коэффициента для периодической структуры с $T = 20$ мкм на частоте резонанса составляла $\alpha_E \approx 1.0$ В/(Э · см), т.е. была того же порядка, что и в структурах со сплошным слоем Ni [11].

На рис. 5 для структуры с $T = 100$ мкм продемонстрирована трансформация зависимости $u_0(H)$ при вращении направления поля H в плоскости структуры. Видно, что при увеличении угла φ между полем H и осью Ni-полосок от нуля до 90° величина H_m возрастает от ~ 70 Э до ~ 230 Э, а максимальная амплитуда напряжения $u_{\max}(H_m)$ при этом монотонно падает от ~ 8 мВ до ~ 2 мВ.

На рис. 6 приведены угловые зависимости МЭ напряжения u для структуры с $T = 100$ мкм, построенные с использованием данных, аналогичных показанным на рис. 5. Кривая демонстрирует сильную анизотропию линейного МЭ эффекта в структуре. Видно, что МЭ напряжение достигает максимума при намагничивании структуры вдоль Ni-полосок (при $\varphi = 0^\circ$) и падает в ~ 4 раза при намагничивании поперек полосок (при $\varphi = 90^\circ$).

Для выяснения природы резонансного пика, показанного на рис. 4, методом Хладни была визуализирована пространственная структура моды колебаний Ni-ЦТС диска. Для этого на поверхность

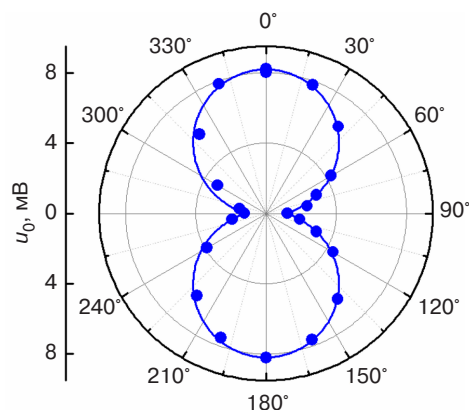


Рис. 6. Зависимость напряжения U_0 для периодической Ni-ЦТС структуры с $T = 100$ мкм от угла φ ориентации поля H в плоскости. Точки – эксперимент, сплошная линия – расчет

Ni-ЦТС диска, возбуждаемого на частоте резонанса $f_0 \approx 2.74$ кГц, был насыпан тонкий слой порошка TiO_2 с размерами частиц $\sim 2\text{--}3$ мкм. Как видно на рис. 7а, порошок собрался вблизи линии нулевого вертикального смещения, которая имеет форму искаженной окружности. Распределение деформаций изгибной моды колебаний диска было рассчитано также с использованием программы *COMSOL Multiphysics*² (COMSOL Group, Швеция). Из рис. 7б видно, что основная мода колебаний имеет одну узловую окружность. Рассчитанная частота этой моды $f_{\text{cal}} = 2.24$ кГц

² Программное обеспечение для моделирования конструкции, устройств и процессов в инженерных, производственных и научных исследованиях. [The software for modeling constructions, devices, and processes in engineering, production, and scientific applications.]

удовлетворительно совпадает с измеренной частотой 2.74 кГц. Разница рассчитанной и измеренной частот и отличие формы узловой диаметра от окружности могут быть связаны с влиянием места крепления диска.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

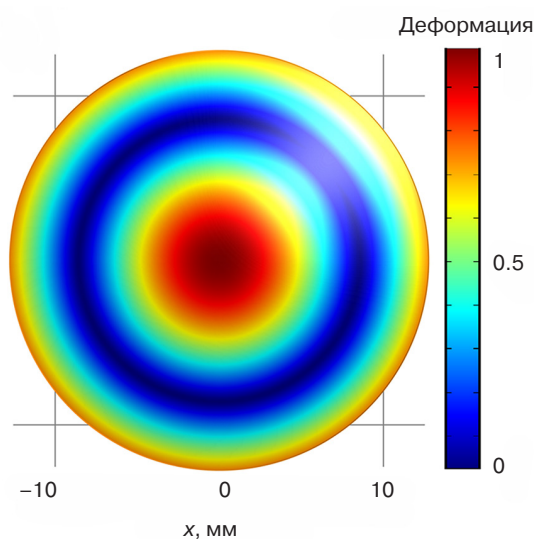
Для объяснения характеристик МЭ эффектов в полосках и периодических Ni-ЦТС гетероструктурах используем теорию низкочастотного линейного МЭ эффекта в планарных ФМ-ПЭ структурах [15]. Величина МЭ напряжения, генерируемого структурой на частоте резонанса, описывается упрощенной формулой

$$u(H) \approx A Q \frac{d_{31} \lambda^{(1)}}{\varepsilon} h, \quad (1)$$

где A – постоянный коэффициент, зависящий только от размеров и механических параметров слоев; Q – добротность акустического резонанса; d_{31} и ε – пьезомодуль и диэлектрическая проницаемость ПЭ слоя; $\lambda^{(1)}(H) = \partial \lambda / \partial H|_H$ – пьезомагнитный коэффициент; $\lambda(H)$ – полевая зависимость магнитострикции ФМ слоя; h – амплитуда возбуждающего магнитного поля. На частоте резонанса амплитуда напряжения возрастает в Q раз, что и наблюдали экспериментально. Вид зависимости $u_0(H)$ при линейном МЭ эффекте (см. рис. 3 и рис. 5) объясняется полевой зависимостью пьезомагнитного коэффициента $\lambda^{(1)}(H)$. Напряжение достигает максимума при оптимальном поле H_m , соответствующем максимуму $\lambda^{(1)}$, а затем падает из-за уменьшения пьезомагнитного коэффициента по мере насыщения ФМ слоя. Амплитуда генерируемого напряжения u_0 линейно растет с увеличением поля h .



(а)



(б)

Рис. 7. (а) Фигура Хладни для моды колебаний Ni-ЦТС диска на частоте резонанса; (б) распределение деформаций изгибной моды колебаний Ni-ЦТС диска, рассчитанное в *COMSOL Multiphysics*

Анизотропия характеристик линейного МЭ эффекта в описанных структурах возникает из-за эффектов размагничивания. Рассмотрим вначале влияние размагничивания на МЭ эффект в одной Ni-полоске. Известно, что в ФМ образце эллипсоидальной формы магнитное поле внутри ферромагнетика H_{in} связано с внешним полем H соотношением [16]

$$H_{in} = H - NM(H_{in}), \quad (2)$$

где N – размагничивающий фактор вдоль главной оси эллипсоида; M – намагниченность ферромагнетика.

Для Ni справедливо соотношение $M = \chi H_{in} \approx \mu H_{in}$, поскольку магнитная проницаемость $\mu = \chi + 1$ и магнитная восприимчивость χ много больше единицы.

Тогда из (2) получаем соотношение

$$H_{in} \approx \frac{H}{1 + N\mu}, \quad (3)$$

т.е. из-за размагничивания поле H_{in} внутри ферромагнетика уменьшается в $1 + N\mu$ раз.

Для полоски Ni прямоугольной формы длиной ~ 20 мм, шириной 100 мкм и толщиной 10 мкм расчет [17] дает размагничивающие факторы $N_1 \approx 0.000002$ и $N_2 \approx 0.67$ при ориентации поля H в плоскости вдоль и поперек к оси полоски соответственно. Разложим поле H на две составляющие $H_1 = H \cos \varphi$, параллельную оси полоски, и $H_2 = H \sin \varphi$, перпендикулярную оси полоски. Соотношение (3) применимо для каждой составляющей в отдельности. Полное поле внутри полоски $H_{in} = \sqrt{H_{in1}^2 + H_{in2}^2}$. Тогда, при касательном намагничивании ФМ полоски под углом φ к ее оси, поле внутри полоски можно найти как

$$H_{in}(H, \varphi) = H \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{(1 + N_1\mu)^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{(1 + N_2\mu)^2}}. \quad (4)$$

Дифференцируя (4) по магнитному полю, находим зависимость пьезомагнитного коэффициента $\lambda^{(1)}(H, \varphi)$ от величины поля H и угла φ , задающего ориентацию поля относительно оси Ni-полосок структуры. Необходимо также учесть, что размагничивание аналогичным образом влияет и на величину поля возбуждения h_{in} внутри ФМ слоя. Расчеты показали, что с увеличением угла φ оптимальное магнитное поле смещения H_m растет, а величина генерируемого при этом поле МЭ напряжения $u_0(H_m)$ падает, что полностью согласуется с данными измерений, приведенными на рис. 5. Угловая зависимость амплитуды МЭ напряжения $u_0(\varphi)$, рассчитанная описанным методом с использованием выражений (1) и (4), соответствующих эксперименту значениях параметров и подгоночном коэффициенте $A_1 = 4.8 \cdot 10^{15}$ В²/м, изображена

сплошной линией на рис. 6. Видно, что предлагаемая теория хорошо описывает результаты эксперимента. Таким образом, сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов позволяет сделать вывод, что учет размагничивания в одиночной Ni-полоске дает возможность качественно хорошо описать анизотропию линейного МЭ эффекта в периодической Ni-ЦТС гетероструктуре. Величина анизотропии МЭ эффекта в структурах с Ni-слоем в виде решетки зависит также и от расстояния между соседними полосками. В работах [18–20] показано, что диполь-дипольное взаимодействие между соседними ФМ-полосками приводит к ослаблению размагничивания с последующим увеличением внутреннего поля в ферромагнетике.

В качестве демонстрации было проведено конечно-элементное моделирование в программе *COMSOL Multiphysics*. Вычисления выполнены для решетки размером в плоскости 16 мм $\times$ 16 мм, состоящей из Ni-полосок шириной $W = 100$ мкм, длиной $L = 16$ мм и толщиной $a_m = 10$ мкм. Расстояние между полосками изменяли от $T = 0.5$ мкм до $T = 100$ мкм. Величину внешнего магнитного поля и относительную магнитную проницаемость Ni брали равными $H = 90$ Э и $\mu = 350$ соответственно. Внутреннее магнитное поле H_{in} рассчитывали в середине центральной Ni-полоски решетки. На рис. 8 изображена рассчитанная зависимость поля H_{in} от расстояния T между полосками при намагничивании решетки перпендикулярно к оси полосок (кривая 1).

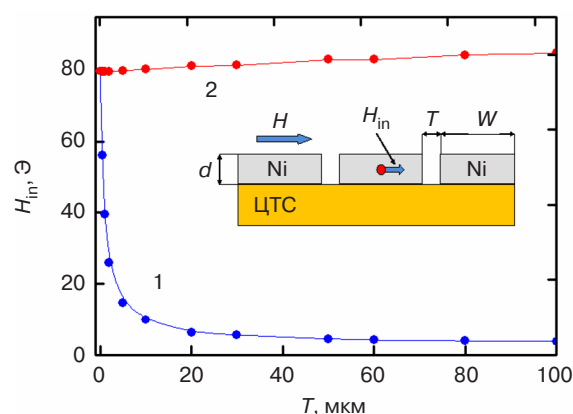


Рис. 8. Зависимость внутреннего поля H_{in} в середине центральной Ni-полоски от расстояния между полосками решетки, намагниченной в поле $H = 90$ Э поперек (1) и вдоль (2) оси Ni-полосок. На вставке схематично изображено поперечное сечение Ni-решетки на ЦТС-подложке

При больших расстояниях $T \gg a_m$, когда каждую Ni-полоску можно считать изолированной от других, поле внутри центральной полоски равно $H_{in} \approx H/(1 + \mu N_2) \approx 0.4$ Э, т.е. внешнее поле ослабляется вследствие размагничивания. Из рис. 8 видно, что диполь-дипольное взаимодействие начинает проявляться при $T \sim a_m = 10$ мкм. С уменьшением T до нуля, т.е. при переходе к сплошному слою Ni, внутреннее

поле становится равным $H_{in} \approx H/(1 + \mu N_3) \approx 79$ Э, где $N_3 \approx 0.0004$ – размагничивающий фактор для сплошного Ni-слоя размерами в плоскости $16 \text{ мм} \times 16 \text{ мм}$ и толщиной 10 мкм [17]. При намагничивании структуры вдоль Ni-полосок (кривая 2 на рис. 8) внутреннее поле уменьшается незначительно, от $H_{in} \approx H/(1 + \mu N_1) \approx 89.6$ Э (изолированная Ni-полоска) до $H_{in} \approx H/(1 + \mu N_3) \approx 79$ Э (сплошной Ni-слой). Поскольку амплитуда МЭ напряжения зависит от внутреннего поля в ФМ слое, то уменьшение расстояния между Ni-полосками приводит к уменьшению анизотропии линейного МЭ эффекта. Таким образом, меняя расстояние между ФМ-полосками в решетке, можно управлять величиной внутреннего поля в полосках и, как следствие, анизотропией МЭ эффекта в периодических гетероструктурах. Описанный анизотропный МЭ эффект в периодических гетероструктурах, содержащих ФМ слой в виде решетки, может быть использован для создания магнитометров, чувствительных к ориентации магнитного поля [21, 22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что в полосках на основе гетероструктур Ni-ЦТС частота резонансного МЭ эффекта и коэффициент МЭ преобразования определяются размерами полоски в плоскости. С уменьшением длины полоски от 23 мм до $\sim 1 \text{ мм}$ частота резонанса возрастает до $\sim 1.4 \text{ МГц}$, а коэффициент МЭ преобразования при этом падает от $\alpha_E \approx 8.8 \text{ В}/(\text{Э} \cdot \text{см})$ практически до нуля. В периодических гетероструктурах в виде решетки из Ni-полосок на поверхности ЦТС-подложки частота резонансного МЭ эффекта определяется размерами подложки в плоскости, а коэффициент МЭ преобразования зависит от ширины

Ni-полосок и расстояния между полосками. МЭ коэффициент для периодических гетероструктур с шириной Ni-полосок $\sim 100 \text{ мкм}$ и расстоянием между ними $20\text{--}100 \text{ мкм}$ равняется $\sim 1 \text{ В}/(\text{Э} \cdot \text{см})$. Теория, учитывающая эффекты размагничивания, хорошо объясняет анизотропию МЭ эффекта при изменении ориентации постоянного поля смещения относительно оси полосок. Анизотропия МЭ эффекта в периодических гетероструктурах может быть использована для создания датчиков постоянных магнитных полей, чувствительных к ориентации поля.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-79-10128). Работы по изготовлению образцов выполнены при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации. Часть измерений проводили на оборудовании Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Вклад авторов

Ф.А. Федулов – проведение измерений, изготовление образцов.

Д.В. Савельев – проведение измерений

Д.В. Чашин – разработка методики исследования.

В.И. Шишкин – обработка результатов.

Ю.К. Фетисов – концептуализация исследования.

Authors' contributions

F.A. Fedulov – conducting measurements, manufacturing samples.

D.V. Saveliev – conducting measurements.

D.V. Chashin – research methodology design.

V.I. Shishkin – processing of results.

Y.K. Fetisov – research concept development.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. Magnetoelectric magnetic field sensors: A review. *Sensors*. 2021;21(18):6322. <https://doi.org/10.3390/s21186322>
2. Gutierrez J., Lasheras A., Martins P., Pereira N., Barandiaran J.M., Lanseros-Mendes S. Metallic glass/PVDF magnetoelectric laminates for resonant sensors and actuators: A review. *Sensors*. 2017;17(6):1251. <https://doi.org/10.3390/s17061251>
3. Tu C., Chu Z.-Q., Spetzler B., et al. Mechanical-resonance-enhanced thin-film magnetoelectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters. *Materials*. 2019;12(14):2259. <https://doi.org/10.3390/ma12142259>
4. Suchtelen van J. Product properties: a new application of composite materials. *Philips Res. Rep.* 1972;27:28–37.
5. Bichurin M., Filippov D., Petrov V., Laetsin V., Paddubnaya N., Srinivasan G. Resonance magnetoelectric effects in layered magneto-strictive-piezoelectric composites. *Phys. Rev. B*. 2003;68(13):10–13. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.132408>
6. Kopyl S., Surmenev R., Surmeneva M., Fetisov Y., Kholkin A. Magnetoelectric effect: principles and applications in biology and medicine – a review. *Mater. Today Bio.* 2021;12:100149. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100149>
7. Li L., Yao X., Gan L., Zhang X., Zhou J.-P. Magnetoelectric anisotropy in laminate composite for detecting magnetic field. *Func. Mater. Lett.* 2018;12(01):1850098. <https://doi.org/10.1142/S1793604718500984>
8. Vopsaroiu M., Stewart M., Fry T., Cain M., Srinivasan G. Tuning the magnetoelectric effect in multiferroic composites via crystallographic texture. *IEEE Trans. Magn.* 2008;44(11):3017–3020. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2001649>
9. Burdin D.A., Ekonomov N.A., Gordeev S.N., Fetisov Y.K. Anisotropy of ME effect in an amorphous ferromagnet-piezoelectric heterostructure. *J. Magn. Mag. Mater.* 2021;521(Part 2):167530. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167530>
10. Fetisov Y., Chashin D., Saveliev D., Fetisov L., Chamonin M. Anisotropic magnetoelectric effect in a planar heterostructure comprising piezoelectric

- ceramics and magnetostrictive fibrous composite. *Materials*. 2019;12(19):3228. <https://doi.org/10.3390/ma12193228>
11. Chashin D.V., Fetisov Y.K., Tafintseva E.V., Srinivasan G. Magnetoelectric effects in layered samples of lead zirconium titanate and nickel films. *Solid State Comm.* 2008;148(1–2): 55–58. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.07.015>
 12. Lasheras A., Gutierrez J., Barandiaran J.M. Quantification of size effects in the magnetoelectric response of metallic glass/PVDF laminates. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(22):222903. <https://doi.org/10.1063/1.4953156>
 13. Timoshenko S. *Vibration Problems in Engineering*. NY: D. Van Nostrand Company Inc.; 1955. 468 p.
 14. Nan T., Hui Y., Rinaldi M., Sun N.X. Self-biased 215 MHz magnetoelectric MEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic fields detection. *Sci. Rep.* 2013;3:1985. <https://doi.org/10.1038/srep01985>
 15. Bichurin M., Petrov V., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers. *Phys. Rev. B.* 2003;68(5):1–13. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.054402>
 16. Osborn J.A. Demagnetizing factors of the general ellipsoid. *Phys. Rev.* 1945;67(11–12):351–357. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.67.351>
 17. Chen D.X., Pardo E., Sanchez A. Demagnetizing factors of rectangular prisms and ellipsoids. *IEEE Trans. Magn.* 2002;38(4):1742–1752. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2002.1017766>
 18. Malkinski L.M., Yu M., Scherer D.J. Magnetostatic interactions in two-dimensional arrays of magnetic strips. *Mater. Res. Symp. Proc.* 2010;1250:G08–03. <https://doi.org/10.1557/PROC-1250-G08-03>
 19. Encinas-Oropesa A., Demand M., Piroux L., Huynen I., Ebels U. Dipolar interaction in arrays of nickel nanowires studied by ferromagnetic resonance. *Phys. Rev. B.* 2001;63(10):104415. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.104415>
 20. Tartakovskaya E.V., Vovk A., Golub V. Dipolar interaction in ordered superlattices of ferromagnetic nanoparticles. *Phys. Stat. Sol. A.* 2008;205(8):1787–1789. <https://doi.org/10.1002/pssa.200723610>
 21. Zhai J., Dong S., Xing Z., Li J., Viehland D. Geomagnetic sensor based on giant magnetoelectric effect. *Appl. Phys. Lett.* 2007;91(12):125513. <https://doi.org/10.1063/1.2789391>
 22. Duc N.H., Tu B.D., Ngoc N.T., Lap V.D., Giang T.H. Metglas/PZT-magnetoelectric 2-D geomagnetic device for computing precise angular position. *IEEE Trans. Magn.* 2013;49(8):4839–4842. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2241446>

Об авторах

Федулов Фёдор Александрович, к.т.н., инженер Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ostsilograf@ya.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Савельев Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Чашин Дмитрий Владимирович, к.т.н., ведущий инженер Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chashindv@ya.ru. Scopus Author ID 23977510200, <https://orcid.org/0000-0002-1031-6696>

Шишкин Владимир Ильич, к.х.н., доцент, заместитель директора Учебно-научного объединения «Электроника» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shishkin@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2480-1182>

Фетисов Юрий Константинович, д.ф.-м.н., профессор, директор Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: fetisov@mirea.ru. Scopus Author ID 7003504213, <https://orcid.org/0000-0002-8627-2730>

About the authors

Fedor A. Fedulov, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Scientific and Education Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ostsilograf@ya.ru. Scopus Author ID 57194284263, <https://orcid.org/0000-0003-2188-0011>

Dmitriy V. Saveliev, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Dmitriy V. Chashin, Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer, Scientific and Education Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chashindv@ya.ru. Scopus Author ID 23977510200, <https://orcid.org/0000-0002-1031-6696>

Vladimir I. Shishkin, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor, Deputy Director, Education and Science Association “Electronics,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: shishkin@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2480-1182>

Yuri K. Fetisov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Director, Scientific and Education Center “Magnetoelectric materials and devices,” MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: fetisov@mirea.ru. Scopus Author ID 7003504213, <https://orcid.org/0000-0002-8627-2730>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.913, 538.958, 538.975
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-74-84>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ поляризации ТГц-излучения с помощью решетчатого поляризатора и кристалла ZnTe

Ф.А. Зайнуллин[@], Д.И. Хусяинов, М.В. Козинцева, А.М. Буряков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: madflyzero@gmail.com

Резюме

Цели. Химический состав и молекулярная структура органических соединений обладают высокой чувствительностью к терагерцовому излучению. Поэтому терагерцовая спектроскопия во временной области в настоящее время является перспективным методом исследования в области фармакологии и медицины. Однако из-за того, что многие биомолекулы обладают хиральностью, их анализ проводится путем облучения ТГц-излучением с круговым дихроизмом. В частности, круговой дихроизм ТГц-излучения позволяет исследовать «мягкие» колебательные движения биомолекул с различной закрученностью. Точный контроль параметров этого излучения очень важен при исследовании биологических материалов. Цель работы – описать метод, позволяющий охарактеризовать поляризацию ТГц-излучения на примере использования черного фосфора в качестве источника.

Методы. Анализ параметров поляризации ТГц-излучения, экспериментально полученных методом спектроскопии временного разрешения, а также с использованием терагерцовых поляризаторов, проводился путем математического моделирования взаимодействия ТГц-излучения и кристалла ZnTe в качестве детектора.

Результаты. В работе подробно рассмотрены две схемы терагерцовой спектроскопии с кристаллом ZnTe в качестве детектора. Определение параметров поляризации выполнено с использованием одного или двух решетчатых ТГц-поляризаторов. Выведено выражение для аппроксимации зависимостей размаха амплитуды ТГц-излучения от угла поворота решетчатого ТГц-поляризатора для этих случаев. Рассмотрено влияние величины напряженности электрического поля терагерцового излучения на форму поляризационных зависимостей. Определен угол поворота эллипса поляризации ТГц-излучения, испускаемого поверхностью объемного слоистого кристалла черного фосфора при воздействии на него фемтосекундных лазерных импульсов.

Выводы. Амплитуда напряженности электрического поля ТГц-излучения начинает влиять на форму поляризационных зависимостей, когда ее величина становится сравнимой или превышает 40 кВ/см.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия временного разрешения, эллиптичность, поляризация, электрооптический кристалл, электрооптическое стробирование

• Поступила: 21.02.2022 • Доработана: 13.04.2022 • Принята к опубликованию: 26.04.2022

Для цитирования: Зайнуллин Ф.А., Хусяинов Д.И., Козинцева М.В., Буряков А.М. Анализ поляризации ТГц-излучения с помощью решетчатого поляризатора и кристалла ZnTe. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):74–84. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-74-84>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Polarization analysis of THz radiation using a wire grid polarizer and ZnTe crystal

Farkhad A. Zainullin[@], Dinar I. Khusyainov, Marina V. Kozintseva,
Arseniy M. Buryakov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: madflyzero@gmail.com

Abstract

Objectives. Terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) is currently a promising research method in pharmacology and medicine due to the high sensitivity of terahertz radiation to the chemical composition and molecular structure of organic compounds. However, due to the chirality of many biomolecules, their analysis is performed by THz irradiation with circular dichroism. In particular, circular dichroism of THz radiation allows the study of “soft” vibrational movements of biomolecules with different chiralities. Therefore, when studying such biological materials, accurate control of THz radiation parameters is essential. The paper describes a method for characterizing THz radiation polarization on the example of a black phosphorus source material.

Methods. The analysis of polarization parameters of THz radiation experimentally obtained by THz-TDS and using terahertz polarizers was performed by mathematical modeling of the interaction between THz radiation and a ZnTe crystal as a detector.

Results. Two schemes of terahertz spectroscopy with the ZnTe crystal as the detector were discussed in detail. The polarization parameters were determined using one or two wire-grid THz polarizers. An expression for approximating the dependences of the peak-to-peak amplitude of THz radiation on the rotation angle of the wire-grid THz polarizer for these cases was derived. The impact of the terahertz electric field intensity value on the shape of polarization dependences was considered. The rotation angle of the polarization ellipse of THz radiation emitted by the surface of a bulk-layered black phosphorus crystal illuminated by femtosecond laser pulses was determined.

Conclusions. The amplitude of the THz radiation electric field intensity begins to impact the shape of polarization dependences when its value becomes comparable to or exceeds 40 kV/cm.

Keywords: time-resolved terahertz spectroscopy, ellipticity, polarization, electrooptic crystal, electrooptic sampling

• Submitted: 21.02.2022 • Revised: 13.04.2022 • Accepted: 26.04.2022

For citation: Zainullin F.A., Khusyainov D.I., Kozintseva M.V., Buryakov A.M. Polarization analysis of THz radiation using a wire grid polarizer and ZnTe crystal. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):74–84. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-74-84>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы технология терагерцовой спектроскопии временного разрешения обеспечила точный и простой подход к анализу характеристик материалов. Благодаря неионизирующему взаимодействию и сильной проникающей способности терагерцового излучения можно получать дополнительную информацию о химическом составе или электрон-фононном взаимодействии в образце [1–3]. В отличие от инфракрасной (ИК) и рамановской спектроскопии, терагерцовая спектроскопия очень

чувствительна к молекулярной структуре и межмолекулярным взаимодействиям в кристаллах, что является особенно ценным для медицины при исследованиях в области фармакологии [4]. Кроме того, по сравнению с классическими методами спектроскопии среднего инфракрасного диапазона и рентгеновской дифракцией, ТГц-излучение возбуждает более длинноволновые колебания, такие как фононы в полупроводниковом кристалле или молекулярные колебания в органическом веществе. Поэтому оно может обеспечить высокую надежность при идентификации соединений, которые трудно различимы

другими методами [5]. Для анализа материалов ТГц-излучением используется методика терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS). Данная методика используется при анализе слабых межмолекулярных взаимодействий таких, как колебания решетки [6], водородная связь [7], ван-дер-ваальсово взаимодействие [8] и коллективные моды колебаний, определяемые молекулярной конфигурацией, конформацией и общей вибрацией молекул органических веществ [9]. В частности, импульсы терагерцового диапазона с эллиптической поляризацией волны интересны с точки зрения фундаментальной физики и технологического применения. Например, многие биомолекулы имеют хиральную структуру с вращательными/колебательными модами в терагерцовом диапазоне энергий, взаимодействие которых с эллиптически поляризованными ТГц-пучками зависит от поляризации ТГц-излучения и хиральности биомолекул. Это позволяет, в частности, исследовать «мягкие» моды колебательного движения органических молекул с различной закрученностью [10–12]. Поэтому для описания взаимодействия ТГц-импульса с веществом необходимо знать параметры поляризации ТГц-излучения, в том числе эллиптичность и направление вращения вектора напряженности поля [13–15]. Одной из наиболее распространенных модификаций метода THz-TDS является метод электрооптического стробирования, где в качестве детектора ТГц-излучения используется нелинейный оптический кристалл ZnTe (Россия) в двух вариантах детектирования, основанных на измерении модуляции фазы и модуляции амплитуды [16].

В качестве исследуемого источника ТГц-излучения был выбран кристаллит черного фосфора – BP (2dsemiconductors, США)¹, который является одним из самых перспективных составляющих ТГц-устройств в классе слоистых полупроводников. В первую очередь это связано с тем, что черный фосфор является «золотой серединой» между графеном (отсутствие запрещенной зоны) и полупроводниковыми дихалькогенидами переходных металлов (TMDCs), такими как дисульфид молибдена (MoS₂) с относительно большой запрещенной зоной около 2 эВ [15]. Более того, варьируя число слоев от одного до нескольких, можно получать наноразмерные пленки с перестройкой ширины запрещенной зоны от 1.5 эВ до 0.53 эВ [17]. Этот материал обладает высокой подвижностью носителей (существенно большей, чем в TMDCs), которая также зависит от числа слоев в диапазоне от 299 до 3730 см²/В·с у электронов и у дырок – от 337 до 10000 см²/В·с [18, 19]. Это позволяет эффективно поглощать терагерцовое излучение даже

если энергия фотонов ниже энергии запрещенной зоны. Также существует возможность настройки (изменения) ширины запрещенной зоны приложением статического электрического поля [17]. Такая динамическая настройка запрещенной зоны может не только расширить рабочий диапазон длин волн устройств на основе черного фосфора, но и проложить путь для исследования электрически настраиваемых топологических изоляторов и полуметаллов. При этом кристаллит черного фосфора позволяет получать эллиптически-поляризованное ТГц-излучение при облучении линейно-поляризованным фемтосекундным лазерным излучением [13].

В работе подробно рассмотрены два варианта анализа поляризации терагерцового излучения. В первом варианте в THz-TDS для анализа используются два решетчатых поляризатора (WGP – wire-grid polarizer), во втором – используется один.

МЕТОДЫ

Детектирование ТГц-излучения выполняется методом электрооптического стробирования – это один из вариантов метода терагерцовой спектроскопии временного разрешения. Поляризация лазерного пучка зондирования модулируется ТГц-пучком в электрооптическом кристалле ZnTe. При использовании метода модуляции амплитуды [16] после кристалла ZnTe на пути пучка зондирования перед фотодиодом (ThorLabs, США)² устанавливается оптический поляризатор, скрещенный с направлением поляризации пучка. Под действием ТГц-импульса поляризация пучка меняется, и на диоде регистрируется сигнал, пропорциональный амплитуде ТГц-излучения. Далее метод детектирования будет описан более подробно.

Для описания электрооптических эффектов в нелинейных оптических кристаллах рассмотрим вектор электрической индукции для однородной среды:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость, независимая от направления скалярная величина; $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля. В кристалле диэлектрическая проницаемость может зависеть от направления электрического поля относительно кристаллографических осей. В этом случае диэлектрическая проницаемость является симметричным тензором $\hat{\varepsilon}$, и поле $\mathbf{D}$ в общем случае непараллельно полю электрической напряженности. Можно выполнить преобразование главных осей в ортогональную систему

¹ <https://www.2dsemiconductors.com>, дата обращения 22.12.2019. [<https://www.2dsemiconductors.com>. Accessed December 22, 2019.]

² <https://www.thorlabs.com>, дата обращения 22.12.2019. [<https://www.thorlabs.com>. Accessed December 22, 2019.]

координат, в которой $\mathbf{E}$ и $\mathbf{D}$ связаны через диагональную матрицу:

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Если диагональные элементы ε_i не все одинаковы, как это происходит в CaCO_3 [20], то кристалл проявляет двулучепреломление.

Плотность энергии электрического поля равна $\omega_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}$. Используя матрицу (2), можно показать, что поверхности с постоянной плотностью энергии являются эллипсоидами в поле $\mathbf{D}$:

$$\varepsilon_0 \omega_e = \mathbf{D} \cdot \hat{\varepsilon}^{-1} \cdot \mathbf{D} = \frac{D_1^2}{\varepsilon_1} + \frac{D_2^2}{\varepsilon_2} + \frac{D_3^2}{\varepsilon_3}. \quad (3)$$

Введем безразмерный вектор $\mathbf{u}$ вдоль направления $\mathbf{D}$ по формуле $\mathbf{u} = \frac{\mathbf{D}}{\sqrt{2\varepsilon_0\omega_e}}$, тогда получим уравнение эллипсоида с показателями преломления:

$$\frac{u_1^2}{n_1^2} + \frac{u_2^2}{n_2^2} + \frac{u_3^2}{n_3^2} = 1, \quad (4)$$

где $n_i = \sqrt{\varepsilon_i}$ для немагнитного материала. Определим тензор непроницаемости как:

$$\hat{\eta} = \hat{\varepsilon}^{-1}. \quad (5)$$

С помощью выражения (5) уравнение (3) преобразуется к уравнению эллипсоида:

$$\mathbf{u} \cdot \hat{\eta} \cdot \mathbf{u} = 1. \quad (6)$$

Теллурид цинка имеет кубическую кристаллическую решетку и является оптически изотропным в отсутствии приложенного электрического поля. Это означает, что тензор проницаемости может быть заменен скалярной величиной ε^{-1} , умноженной на единичную матрицу $\mathbf{I}$. В присутствии электрического поля тензор непроницаемости становится равным:

$$\hat{\eta}(\mathbf{E}) = \varepsilon^{-1} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{r} \cdot \mathbf{E}. \quad (7)$$

Второй член (7) описывается эффектом Поккельса, где $\mathbf{r}$ – тензор электрооптических коэффициентов. Электрооптическим эффектом Керра, который является квадратичным по электрическому полю, здесь можно пренебречь, т.к. в кристалле ZnTe

он является пренебрежимо малым по сравнению с линейным эффектом. Следовательно, после подстановки (7) в уравнение (6) уравнение эллипсоида примет вид:

$$\mathbf{u} \cdot \hat{\eta}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{u} = \sum_{i,j=1,2,3} \left(\varepsilon^{-1} \cdot \delta_{ij} + \sum_{k=1,2,3} r_{ijk} E_k \right) u_i u_j = 1. \quad (8)$$

Тензор $\hat{\eta}$ симметричен, поэтому $r_{ijk} = r_{jik}$. Принято заменять первые два индекса i, j тензора $\mathbf{r}$ одним индексом:

$$r_{11k} \rightarrow r_{1k},$$

$$r_{22k} \rightarrow r_{2k},$$

$$r_{33k} \rightarrow r_{3k},$$

$$r_{23k} = r_{32k} \rightarrow r_{4k},$$

$$r_{13k} = r_{31k} \rightarrow r_{5k},$$

$$r_{12k} = r_{21k} \rightarrow r_{6k}.$$

Теллурид цинка ZnTe кристаллизуется в структуре цинковой обманки (zincblende – две гранецентрированные кубические решетки, которые сдвинуты друг относительно друга на четверть пространственной диагонали) [21]. В отсутствие приложенного электрического поля показатели преломления равны, т.е. $n_1 = n_2 = n_3 = n_0$. Кроме того, $\mathbf{r}$ содержит только один независимый ненулевой элемент: $r_{41} = r_{52} = r_{63}$. Следовательно, уравнение эллипсоида (8) примет следующий вид:

$$\frac{1}{n_0^2} (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) + 2r_{41} (E_1 u_2 u_3 + E_2 u_3 u_1 + E_3 u_1 u_2) = 1. \quad (9)$$

Кристаллы ZnTe, используемые для детектирования ТГц-излучения, имеют кристаллографический срез (1 1 0), как показано на рис. 1. ТГц-импульс и лазерный импульс падают перпендикулярно этой плоскости вдоль направления $[-1 \ -1 \ 0]$, поэтому их электрические векторы лежат в плоскости (1 1 0). Введем двумерную систему координат (X, Y) в этой плоскости таким образом, чтобы направление X совпало с направлением $[-1 \ 1 \ 0]$, а Y – с направлением $[0 \ 0 \ 1]$.

Для получения показателей преломления в плоскости XY при приложении электрического поля необходимо выполнить преобразование главных осей.

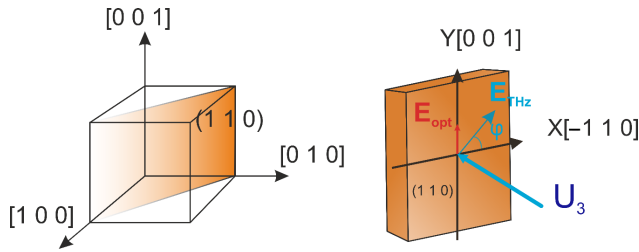


Рис. 1. Плоскость (1 1 0) (слева) и система координат (X, Y) в этой плоскости (справа).

Фемтосекундный лазерный импульс зондирования и ТГц-импульс накачки направлены вдоль вектора $\mathbf{U}_3$, который является нормалью к плоскости (1 1 0)

Пусть электрический вектор $\mathbf{E}_{\text{THz}}$ ТГц-импульса составляет угол φ с осью X (ось $[-1 \ 1 \ 0]$ кристалла ZnTe). Его компоненты в базисной системе кубической кристаллической решетки имеют вид:

$$\mathbf{E}_{\text{THz}} = E_{\text{THz}} \begin{pmatrix} -\cos \varphi / \sqrt{2} \\ \cos \varphi / \sqrt{2} \\ \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Уравнение (9) в этом случае запишется так:

$$\mathbf{u} \cdot \hat{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{E}_{\text{THz}}) \cdot \mathbf{u} = 1,$$

где $\hat{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{E}_{\text{THz}})$ – тензор непроницаемости, зависящий от поля $\mathbf{E}_{\text{THz}}$:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{E}_{\text{THz}}) = \frac{1}{n_0^2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + r_{41} E_{\text{THz}} \begin{pmatrix} 0 & \sin \varphi & \cos \varphi / \sqrt{2} \\ \sin \varphi & 0 & -\cos \varphi / \sqrt{2} \\ \cos \varphi / \sqrt{2} & -\cos \varphi / \sqrt{2} & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Далее из выражения (11) находим собственные значения тензора $\hat{\boldsymbol{\eta}}(\mathbf{E}_{\text{THz}})$:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{n_0^2} - \frac{r_{41} E_{\text{THz}}}{2} \left(\sin \varphi \pm \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi} \right),$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{n_0^2} + r_{41} E_{\text{THz}} \sin \varphi. \quad (12)$$

При этом нормированные собственные векторы будут равны:

$$\mathbf{U}_1 = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2\sqrt{2} \cos \varphi / (\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi} + \sin \varphi) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{U}_2 = \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 2\sqrt{2} \cos \varphi / (\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi} - \sin \varphi) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{U}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Направления главных осей совпадают с направлениями собственных векторов. Показатели преломления определяются выражением:

$$n_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}.$$

Учитывая, что $r_{41} E_{\text{THz}} \ll \frac{1}{n_0^2}$, получаем выражения для показателей преломления, соответствующих главным осям:

$$n_1 = n_0 + \frac{n_0^3 r_{41} E_{\text{THz}}}{4} \left(\sin \varphi + \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi} \right),$$

$$n_2 = n_0 + \frac{n_0^3 r_{41} E_{\text{THz}}}{4} \left(\sin \varphi - \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi} \right), \quad (14)$$

$$n_3 = n_0 - \frac{n_0^3 r_{41} E_{\text{THz}}}{2} \sin \varphi.$$

Из уравнения (13) очевидно (рис. 1, направление $\mathbf{U}_3$), что третья главная ось перпендикулярна плоскости кристалла (1 1 0). Это направление совпадает с направлением распространения ТГц-импульса накачки и импульса пучка зондирования. Вектор $\mathbf{U}_1$ лежит в плоскости (1 1 0) и составляет с осью X $[-1 \ 1 \ 0]$ угол ψ , который может быть вычислен с помощью скалярного произведения вектора $\mathbf{U}_1$ и единичного вектора вдоль оси X. Используя соотношение $\cos(2\psi) = 2 \cos^2 \psi - 1$, получаем выражение, связывающее угол ψ и угол φ поляризации ТГц-излучения:

$$\cos(2\psi) = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}}. \quad (15)$$

Для $\varphi = \pi/2$ главная ось $\mathbf{U}_1$ направлена в направлении X, а ось $\mathbf{U}_2$ – в направлении Y. Следовательно, в случае приложения к кристаллу ZnTe электрического поля (ТГц-излучения) будет возникать эллипсоид показателя преломления, в сечении XY которого получится эллипс (рис. 2). Направления главных осей эллипса соответствуют направлениям векторов $\mathbf{U}_1$ и $\mathbf{U}_2$. Показатели преломления равны n_1 и n_2 и соответствуют первым

двум главным осям. Большой показатель (n_s) соответствует более медленной скорости света, меньший (n_f) – более быстрой. Обозначать показатели преломления принято через $n_s = n_1$ и $n_f = n_2$.

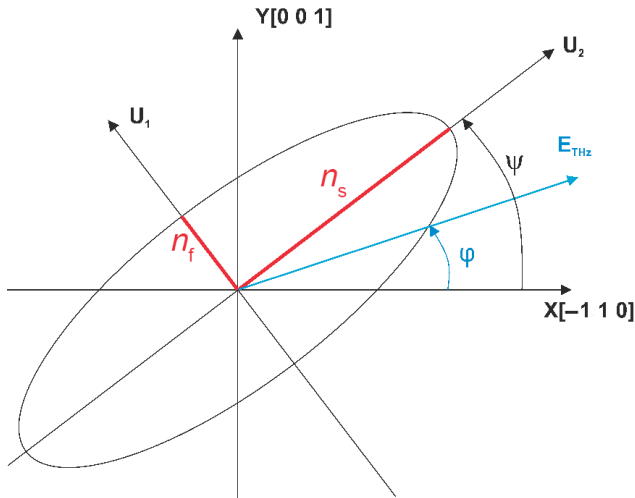


Рис. 2. Эллипсоид показателя преломления, спроецированный на плоскость (1 1 0) кристалла теллурида цинка

Вектор напряженности электрического поля E_{THz} составляет угол φ с осью $X = [-1 \ 1 \ 0]$ кристалла ZnTe, в то время как угол между длинной полуосью эллипса и осью X равен $\psi(\varphi)$. ТГц-импульс, как и лазерный пучок, падают вдоль нормали к плоскости (1 1 0), заданной единичным вектором

$$U_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Лазерный луч падает на кристалл ZnTe вдоль направления $[-1 \ -1 \ 0]$ (собственный вектор U_3). Поэтому его электрический вектор E_{opt} лежит в плоскости (1 1 0). В кристалле толщиной d две компоненты E_{opt} вдоль главных осей U_1 и U_2 получают относительный фазовый сдвиг:

$$\Gamma(\varphi) = \frac{\omega d}{2c} n_0^3 r_{41} E_{THz} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}, \quad (16)$$

где ω – угловая частота лазерного излучения; φ – угол между E_{THz} и осью X ; d – толщина кристалла ZnTe; c – скорость света.

Для описания регистрируемого фотодиодом сигнала используется матрица Джонса, описывающая прохождение линейно поляризованного лазерного пучка через кристалл с двулучепреломлением и оптическим поляризатором [22]. S-поляризованное лазерное излучение описывается вектором:

$$E_{opt} = E_{opt} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где E_{opt} – напряженность электрического поля лазерного пучка зондирования. Поворот плоскости поляризации на угол ψ описывается матрицей:

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где $\psi = \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}} \right]$ – угол поворота эллипса поляризации пучка в ZnTe под действием ТГц-импульса.

Матрица двулучепреломления для кристалла ZnTe имеет вид:

$$Z(\varphi) = \begin{pmatrix} \exp(-i\Gamma(\varphi)/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\Gamma(\varphi)/2) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Влияние ZnTe на пучок зондирования можно описать в следующем виде:

$$E_{opt} R(-\psi) Z(\varphi) R(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Напряженность электрического поля пучка зондирования после прохождения ZnTe и оптического поляризатора описывается формулой:

$$E = (1 \ 0) E_{opt} R(-\psi) Z(\varphi) R(\psi) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Сигнал, снимаемый фотодиодом, равен следующему выражению:

$$S_x(\varphi) = K \cdot E_{opt}^2 \sin^2(2\psi(\varphi)) \sin^2\left(\frac{\Gamma(\varphi)}{2}\right), \quad (20)$$

где K – коэффициент оптоэлектронного преобразования фотодиода.

Выразив в (20) $\sin^2(2\psi(\varphi)) = 1 - \cos^2(2\psi(\varphi))$ и подставив выражения (15) и (16), получим итоговое выражение для аппроксимации:

$$S_x(\varphi) = K \cdot E_{opt}^2 \left(1 - \frac{\sin^2 \varphi}{1 + 3 \cos^2 \varphi} \right) \times \sin^2 \left(\frac{(\omega d / 2c) n_0^3 r_{41} E_{THz} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \varphi}}{2} \right). \quad (21)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения поляризации ТГц-излучения в работе применена традиционная экспериментальная схема THz-TDS, представленная на рис. 3. В качестве источника лазерного излучения использовался фемтосекундный титан-сапфировый лазер с регенеративным усилителем, генерирующий оптические импульсы с частотой повторения 3 кГц, длительностью 35 фс, с центральной длиной волны 800 нм (Авеста-Проект, Россия)³. Выходной оптический пучок был разделен на пучок накачки и пучок зондирования. Пучок накачки фокусировался на поверхности кристаллита ВР под углом 45°. Плотность оптического излучения на поверхности образца составляла около 1 мДж/см². Генерируемое ТГц-излучение коллимировалось параболическим зеркалом. Затем терагерцовое излучение проходило через два решетчатых поляризатора WGP (Specac Ltd, Великобритания)⁴ и параболическим зеркалом фокусировалось на нелинейный оптический кристаллический детектор ZnTe. Пробный пучок проходил через линию задержки и фокусировался на кристалл ZnTe, совмещенный с терагерцовым пучком. Прошедший оптический зондирующий пучок регистрировался фотодиодом. Для регистрации терагерцового излучения использовался электрооптический метод, основанный на модуляции амплитуды [16]. Все исследования проводились при комнатной температуре.

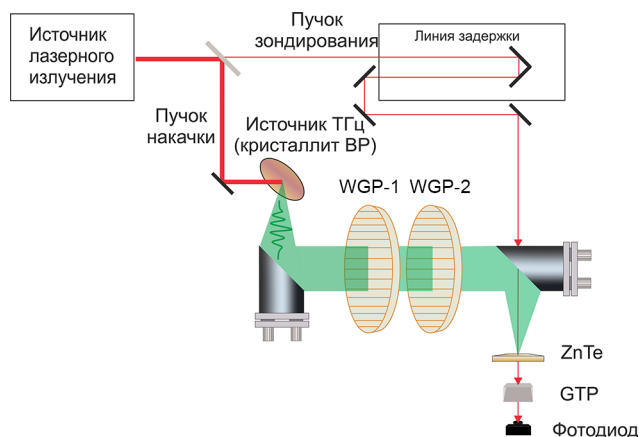


Рис. 3. Схема экспериментальной установки THz-TDS. GTP – поляризатор Глана – Тейлора

На рис. 4 подробно показана часть экспериментальной установки, отвечающая за определение угла поляризации ТГц-излучения. Угол между осью пропускания анализатора WGP-2, которая совпадает

с вектором E_{THz} , и осью X зафиксирован и равен φ_3 . Поляризатор WGP-1 вращается. Угол между его осью пропускания, совпадающей с вектором E'_{THz} , и осью X равен φ_2 .

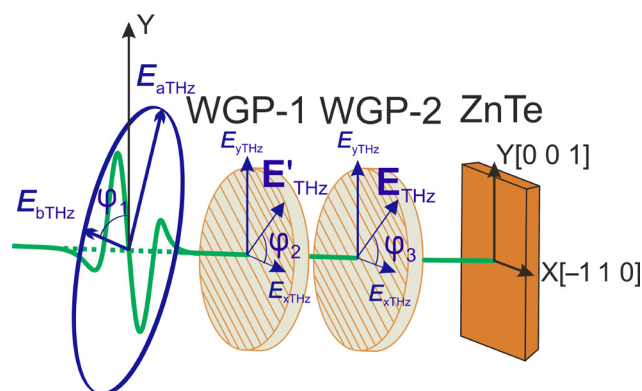


Рис. 4. Геометрия экспериментальной установки в случае использования двух поляризаторов

Эллипс поляризации ТГц-излучения лежит в плоскости, параллельной плоскости XY . $E_{a\text{THz}}$ и $E_{b\text{THz}}$ – полуоси этого эллипса; φ_1 – угол между малой полуосью и осью Y ; φ_2 и φ_3 – углы между осью X и осями поляризаторов WGP-1 и WGP-2 соответственно.

В этом случае в формуле (16) амплитуда ТГц-излучения согласно закону Малюса принимает следующий вид:

$$E_{\text{THz}} = E'_{\text{THz}} \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \quad (22)$$

где $E'_{\text{THz}} = E_{a\text{THz}} \sqrt{\cos^2(\varphi_1 + \varphi_2) + \varepsilon^2 \sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)}$ – ТГц-импульс, прошедший через первый поляризатор WGP-1; $\varepsilon = \frac{E_{b\text{THz}}}{E_{a\text{THz}}}$ – эллиптичность анализируемого импульса. Нормируя зависимость (21) на мощность оптического пучка, одновременно учитывая выражение (22) и зафиксировав значения углов φ_1 и φ_3 , получаем зависимость для регистрируемого фотодиодом нормированного сигнала $f(\varphi_2)$:

$$f(\varphi_2) = \frac{S_x(E_{\text{THz}}(\varphi_1, \varphi_2), \varphi_3)}{E_{\text{opt}}^2} = \sin^2(2\psi(\varphi_3)) \sin^2\left(\frac{\Gamma(E_{\text{THz}}(\varphi_1, \varphi_2), \varphi_3)}{2}\right). \quad (23)$$

На рис. 5 изображены графики зависимости $f(\varphi_2)$, полученные из выражения (23) при различных значениях углах поляризации ТГц-излучения φ_1 . Остальные параметры ТГц-излучения и положения поляризатора WGP-2 были равны: $E_{a\text{THz}} = 3.5 \cdot 10^6$ В/м; $\varepsilon = 0.1$;

³ <http://avesta.ru/>, дата обращения 22.12.2019. [<http://avesta.ru/>. Accessed December 22, 2019 (in Russ.).]

⁴ <https://www.specac.com>, дата обращения 22.12.2019. [<https://www.specac.com>. Accessed December 22, 2019.]

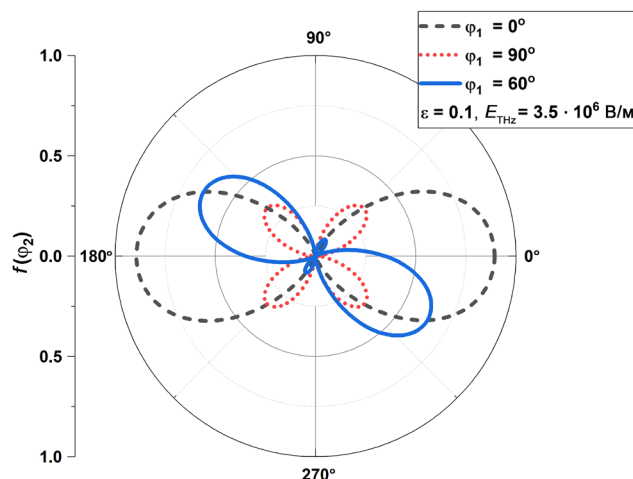


Рис. 5. Графики зависимости регистрируемого сигнала, нормированного на мощность оптического излучения пучка зондирования

$\varphi_1 = 0^\circ$. В результате расчета при $\varphi_1 = 0^\circ$ получаем график в форме «гантели», при $\varphi_1 = 90^\circ$ – в форме «четырёхлистного клевера», при других углах, например при $\varphi_1 = 60^\circ$, получаем зависимость, по форме являющейся переходной между ними. Поскольку для каждого значения угла зависимость $f(\varphi_2)$ является единственной, можно легко аппроксимировать экспериментальную зависимость выражением (23), получая при этом реальные параметры ТГц-излучения (угол поляризации, эллиптичность).

Условие малости аргумента синуса $\frac{\Gamma(\varphi)}{2}$ выполняется при $\frac{\omega d}{4c} n_0^3 r_{41} E_{aTHz} \leq 0.35$ или при $E_{aTHz} \leq 2 \cdot 10^6$ В/м. Так как в этом случае $\sin^2\left(\frac{\Gamma(\varphi)}{2}\right) \approx \left(\frac{\Gamma(\varphi)}{2}\right)^2$, поляризационные зависимости при прохождении поляризованной электромагнитной волны через два поляризатора соответствуют закону Малюса. Несмотря на это ограничение, форма зависимостей (рис. 4) не будет изменяться вплоть до значений $E_{aTHz} \approx 4 \cdot 10^6$ В/м. В случае детектирования ТГц-волны при $E_{aTHz} > 4 \cdot 10^6$ В/м будут наблюдаться искажения зависимостей, показанных на рис. 5. Это происходит потому, что разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучом оптического пучка становится сравнимой или превышает $\pi/2$.

На рис. 6 изображены графики зависимости $f(\varphi_2)$ (23) для $E_{aTHz} = 6 \cdot 10^6$ В/м при различных углах поляризации ТГц-излучения φ_1 и для значений $\varepsilon = 0.1$, $\varphi_3 = 0$. При увеличении амплитуды ТГц-излучения начинают сильно изменяться формы зависимостей. Так, при $E_{aTHz} = 6 \cdot 10^6$ В/м зависимость $f(\varphi_2)$ при $\varphi_1 = 0^\circ$ имеет форму «бабочки»; при $\varphi_1 = 90^\circ$ так же, как и в вышеописанном случае, имеет вид «четырёхлистного клевера», однако максимальные значения функции уже сравнимы с таковыми для зависимости при $\varphi_1 = 0^\circ$; при других

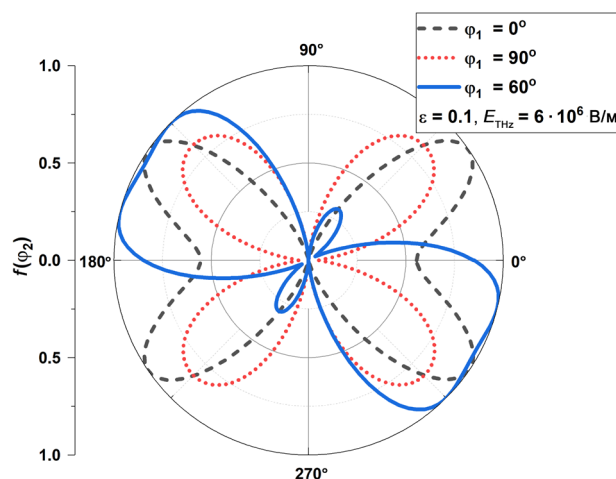


Рис. 6. Графики зависимости регистрируемого сигнала терагерцового импульса, прошедшего через два WG-поляризатора и нормированного на мощность оптического излучения пучка зондирования

значениях φ_1 получаем промежуточную форму между «бабочкой» и «клевером».

Рассмотрим экспериментальную установку анализа ТГц-излучения с одним ТГц-поляризатором. Поскольку кристалл ZnTe чувствителен к поляризации ТГц-импульса, то он одновременно может быть использован в качестве анализатора поляризации (рис. 7).

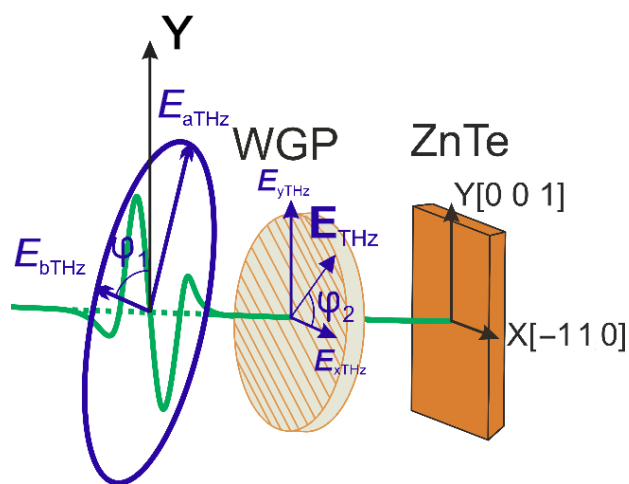


Рис. 7. Геометрия экспериментальной установки в случае использования одного поляризатора

Эллипс поляризации ТГц-излучения лежит в плоскости, параллельной плоскости XY. E_{aTHz} и E_{bTHz} – полуоси эллипса; φ_1 – угол между малой полуосью и осью Y; φ_2 – угол между осью X и осью поляризатора.

В данном случае амплитуда ТГц-импульса, прошедшего через поляризатор WGP, в формуле (16) принимает вид:

$$E_{\text{THz}} = E_{a\text{THz}} \sqrt{\cos^2(\varphi_1 + \varphi_2) + \varepsilon^2 \sin^2(\varphi_1 + \varphi_2)}. \quad (24)$$

Нормируя зависимость (21) на мощность оптического пучка, учитывая выражение (24) и зафиксировав величину угла φ_1 , получаем зависимости $g(\varphi_2)$ при разных углах поляризации исследуемого ТГц-излучения, аналогичные по форме ранее полученным зависимостям (23) (рис. 8):

$$g(\varphi_2) = \frac{S_x(E_{\text{THz}}(\varphi_1), \varphi_2)}{E_{\text{opt}}^2} = \sin^2(2\psi(\varphi_2)) \sin^2\left(\frac{\Gamma(E_{\text{THz}}(\varphi_1), \varphi_2)}{2}\right). \quad (25)$$

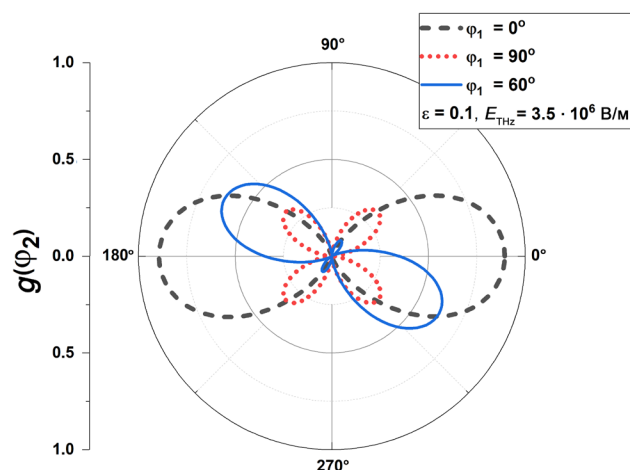


Рис. 8. Графики зависимости регистрируемого сигнала терагерцового импульса, прошедшего через WG-поляризатор и нормированного на мощность оптического излучения пучка зондирования

На рис. 8 изображены графики зависимостей $g(\varphi_2)$ (25) при $E_{a\text{THz}} = 3.5 \cdot 10^6$ В/м, различных углах поляризации ТГц-излучения φ_1 и $\varepsilon = 0.1$. Графики полученных зависимостей совпадают по форме с графиками зависимостей (23) на рис. 5, что свидетельствует о том, что существует возможность анализировать поляризацию ТГц-излучения, используя один WGP. Как и в вышеописанном случае, изменение характера зависимостей (25) наблюдается, если величина напряженности электрического поля $E_{a\text{THz}}$ превышает $4 \cdot 10^6$ В/м.

В качестве исследуемого источника ТГц-излучения был взят кристаллит черного фосфора, эллиптичность излучения которого равна $\varepsilon = 0.77$ при фиксированном угле 90° между вектором напряженности поля возбуждающего лазерного пучка накачки и направлением «зигзаг» образца [13]. Для анализа поляризации была выбрана схема с двумя

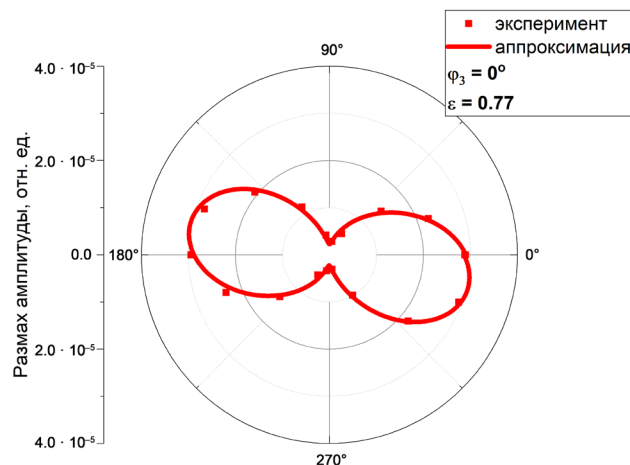


Рис. 9. График зависимости размаха амплитуды ТГц-излучения от угла поворота решетчатого поляризатора WGP-1

решетчатыми поляризаторами (рис. 4). Угол φ_3 для WGP-2 зафиксирован и равен 0° . Полученные значения размаха регистрируемой амплитуды ТГц-излучения при различных углах поворота оси решетчатого поляризатора WGP-1 φ_2 и аппроксимация экспериментальных данных выражением (23) изображены на рис. 9. С помощью аппроксимации было установлено, что угол между большой полуосью эллипса поляризации ТГц-излучения и осью X равен 40° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена и модифицирована модель, описывающая зависимость размаха амплитуды ТГц-излучения от угла поворота решетчатого поляризатора. Результаты моделирования показывают, что зависимости размаха амплитуды ТГц-излучения от угла поворота поляризатора имеют схожую форму при использовании в экспериментальной установке как двух решетчатых поляризаторов, так и одного из них. Показана возможность использования одного поляризатора при анализе за счет чувствительности кристалла ZnTe к поляризации ТГц-излучения. Зависимости начинают отличаться только при возрастании напряженности поля ТГц-волны свыше 40 кВ/см, так как разность фаз между обычным и необыкновенным лучом оптического пучка зондирования после прохождения кристалла ZnTe под действием ТГц-импульса становится сравнимой или превышает $\pi/2$. На примере анализа поляризации ТГц-излучения, испускаемого поверхностью кристаллита черного фосфора под действием фемтосекундного пучка накачки, была показана применимость аппроксимации и определен угол $\varphi_1 = 40^\circ$ между большой полуосью эллипса поляризации ТГц-излучения и осью X .

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10353 «Управляемые спинтронные гибридные ТГц излучатели и детекторы». Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА.

Вклад авторов

Ф.А. Зайнуллин – моделирование и обработка экспериментальных данных.

Д.И. Хусьяинов – экспериментальная часть.

М.В. Козинцева – теоретическая часть.

А.М. Буряков – теоретическая часть.

Authors' contributions

F.A. Zainullin – mathematical modeling and experimental data processing.

D.I. Khusyainov – experiment.

M.V. Kozintseva – theory.

A.M. Buryakov – theory.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cui H., Zhang X.B., Yang P., Su J.F., Wei X.Y., Guo Y.H. Spectral characteristic of single layer graphene via terahertz time domain spectroscopy. *Optik (Stuttg)*. 2015;126(14): 1362–1365. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.03.032>
2. Maamar N., Lazoul M., Latreche F.Y., Trache D., Coutaz J.L. Terahertz time-domain spectroscopy characterization of nitrocellulose in transmission and reflection configurations. *Optik (Stuttg)*. 2020;224:165711. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165711>
3. Tu S., Wang Z., Liang G., Zhang W., Tang Y., She Y., Yi C., Bi X. A novel approach to discriminate transgenic soybean seeds based on terahertz spectroscopy. *Optik (Stuttg)*. 2021;242:167089. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167089>
4. Tan N.Y., Zeitler J.A. Probing phase transitions in simvastatin with terahertz time-domain spectroscopy. *Mol. Pharm.* 2015;12(3):810–815. <https://doi.org/10.1021/mp500649q>
5. Ho L., Pepper M., Taday P. Signatures and fingerprints. *Nat. Photonics*. 2008;2(9):541–543. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.174>
6. Wang W.N., Wang G., Zhang Y. Low-frequency vibrational modes of glutamine. *Chinese Phys. B*. 2011;20(12):123301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/20/12/123301>
7. Du S.Q., Li H., Xie L., Chen L., Peng Y., Zhu Y.M., Li H., Dong P., Wang J.T. Vibrational frequencies of anti-diabetic drug studied by terahertz time-domain spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2012;100(14):143702. <https://doi.org/10.1063/1.3700808>
8. Andersen J., Heimdal J., Mahler D.W., Nelander B., Wugt Larsen R. Communication: THz absorption spectrum of the CO₂–H₂O complex: Observation and assignment of intermolecular van der Waals vibrations. *J. Chem. Phys.* 2014;140(9):091103. <https://doi.org/10.1063/1.4867901>
9. Walther M., Plochocka P., Fischer B., Helm H., Uhd Jepsen P. Collective vibrational modes in biological molecules investigated by terahertz time-domain spectroscopy. *Biopolymers*. 2002;67(4–5):310–313. <https://doi.org/10.1002/bip.10106>
10. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat. Photonics*. 2007;1:97–105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
11. Dadap J.I., Shan J., Heinz T.F. Circularly polarized light in the single-cycle limit: the nature of highly polychromatic radiation of defined polarization. *Opt. Express*. 2009;17(9):7431–7439. <https://doi.org/10.1364/OE.17.007431>
12. Yang X., Zhao X., Yang K., Liu Y., Liu Y., Fu W., et al. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging. *Trends Biotechnol.* 2016;34(10):810–824. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.04.008>
13. Buryakov A., Zainullin F., Khusyainov D., Abdulaev D., Nozdryn V., Mishina E. Generation of elliptically polarized terahertz radiation from black phosphorus crystallites. *Opt. Eng.* 2021;60(08):082013. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.8.082013>
14. Khusyainov D., Ovcharenko S., Gaponov M., Buryakov A., Klimov A., Tiercelin N., Pernod P., Nozdryn V., Mishina E., Sigov A., Preobrazhensky V. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure. *Sci. Rep.* 2021;11(1):697. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80781-5>
15. Huang Y., Yartsev A., Guan S., Zhu L., Zhao Q., Yao Z., He C., Zhang L., Bai J., Luo J., Xu X. Hidden spin polarization in the centrosymmetric MoS₂ crystal revealed via elliptically polarized terahertz emission. *Phys. Rev. B*. 2020;102(8):085205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.085205>
16. Ковалев С.П., Китаева Г.Х. Два альтернативных подхода при электрооптическом детектировании импульсов терагерцового излучения. *Письма в ЖЭТФ*. 2011;94(2):95–100. [Kovalev S.P., Kitaeva G.K. Two alternative approaches to electro-optical detection of terahertz pulses. *JETP Lett.* 2011;94(2):91–96. <https://doi.org/10.1134/S0021364011140074>]
17. Deng B., Tran V., Xie Y., Jiang H., Li C., Guo Q., Wang X., Tian H., Koester S. J., Wang H., Cha J. J., Xia Q., Yang L., Xia F. Efficient electrical control of thin-film black phosphorus bandgap. *Nat. Commun.* 2017;8:14474. <https://doi.org/10.1038/ncomms14474>
18. Long G., Maryenko D., Shen J., Xu S., Hou J., Wu Z., Wong W.K., Han T., Lin J., Cai Y., Lortz R., Wang N. Achieving ultrahigh carrier mobility in two-dimensional hole gas of black phosphorus. *Nano Lett.* 2016;16(12):7768–7773. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03951>
19. Chen X., Wu Y., Wu Z., Han Y., Xu S., Wang L., Ye W., Han T., He Y., Cai Y., Wang N. High-quality sandwiched black phosphorus heterostructure and its quantum oscillations. *Nat. Commun.* 2015;6:7315. <https://doi.org/10.1038/ncomms8315>
20. Hossain F.M., Murch G.E., Belova I.V., Turner B.D. Electronic, optical and bonding properties of CaCO₃ calcite. *Solid State Commun.* 2009;149(29–30):1201–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.04.026>
21. Soykan C., Kart S.Ö. Structural, mechanical and electronic properties of ZnTe polymorphs under pressure. *J. Alloys Compd.* 2012;529:148–157. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.02.170>
22. Yariv A., Yeh P. *Photonics: optical electronics in modern communications*. Oxford University Press; 2007. 836 p.

Об авторах

Зайнуллин Фархад Алмазович, стажер-исследователь специализированной учебно-научной лаборатории «Сверхбыстрая динамика ферроиков» Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: madflyzero@gmail.com. Scopus Author ID 57226613215, <https://orcid.org/0000-0002-1195-5166>

Хусяинов Динар Ильгамович, аспирант, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: husyainov@mirea.ru. Scopus Author ID 57194467463, ResearcherID O-7241-2017, <https://orcid.org/0000-0003-1332-4146>

Козинцева Марина Валентиновна, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kozintseva@mirea.ru. Scopus Author ID 6506049090, ResearcherID C-3826-2017, <https://orcid.org/0000-0002-6277-4074>

Буряков Арсений Михайлович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: buryakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55454206600, ResearcherID E-8283-2017, <https://orcid.org/0000-0002-3347-9076>

About the authors

Farkhad A. Zainullin, Intern Researcher, Laboratory “Ultrafast Dynamics in Ferroics,” Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: madflyzero@gmail.com. Scopus Author ID 57226613215, <https://orcid.org/0000-0002-1195-5166>

Dinar I. Khusyainov, Postgraduate Student, Junior Researcher, Laboratory “Femtosecond Optics for Nanotechnologies,” Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: husyainov@mirea.ru. Scopus Author ID 57194467463, ResearcherID O-7241-2017, <https://orcid.org/0000-0003-1332-4146>

Marina V. Kozintseva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Department of Physics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kozintseva@mirea.ru. Scopus Author ID 6506049090, ResearcherID C-3826-2017, <https://orcid.org/0000-0002-6277-4074>

Arseniy M. Buryakov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory “Femtosecond Optics for Nanotechnologies,” Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: buryakov@mirea.ru. Scopus Author ID 55454206600, ResearcherID E-8283-2017, <https://orcid.org/0000-0002-3347-9076>

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.951+ 538.955+538.956
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анизотропный магнитоэлектрический эффект в структуре цирконат–титанат свинца / магнитострикционный волоконный композит

Д.В. Савельев, Л.Ю. Фетисов[®], В.И. Мусатов, М.В. Джапаридзе

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: fetisovl@yandex.ru

Резюме

Цели. Разработка композитных структур, в которых наблюдается сильно анизотропный магнитоэлектрический (МЭ) эффект, актуальна для создания датчиков, чувствительных к направлению магнитного поля. Такой МЭ эффект может быть обусловлен анизотропией как магнитного, так и пьезоэлектрического слоя. Авторами изготовлен новый анизотропный материал – магнитострикционный волоконный композит (МВК), представляющий собой набор никелевых проволок, расположенных вплотную параллельно друг к другу в один слой и погруженных в полимерную матрицу. Цель работы – исследование линейного МЭ эффекта в композитных структурах со слоями из МВК и керамики цирконата титаната свинца (ЦТС-19).

Методы. Магнитострикция МВК была измерена тензометрическим методом, МЭ эффект – методом низкочастотной модуляции магнитного поля.

Результаты. Были изготовлены структуры с диаметрами никелевых проволок 100, 150 и 200 мкм. Измерены полевые зависимости магнитострикции МВК, а также частотные, полевые и амплитудные зависимости МЭ напряжения для случая линейного МЭ эффекта при различной величине угла между направлением магнитного поля и проволоками. Показано, что все образцы обладают сильной анизотропией относительно направления магнитного поля. МЭ напряжение уменьшается от максимального значения до нуля при изменении направления магнитного поля с параллельного до перпендикулярного относительно волокон никеля.

Выводы. Наибольшим по величине МЭ коэффициентом, составляющим 1.71 В/(Э · см), обладает структура, изготовленная на основе МВК с диаметром проволоки 150 мкм. Частота резонанса растет от 3.5 кГц до 6.5 кГц с увеличением диаметра проволок. Величина магнитострикции МВК сопоставима по величине с магнитострикцией пластины никеля такой же толщины.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитострикция, волоконные композиты, пьезоэффект, анизотропия

• Поступила: 03.12.2021 • Доработана: 15.02.2022 • Принята к опубликованию: 20.04.2022

Для цитирования: Савельев Д.В., Фетисов Л.Ю., Мусатов В.И., Джапаридзе М.В. Анизотропный магнитоэлектрический эффект в структуре цирконат–титанат свинца / магнитострикционный волоконный композит. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):85–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures

Dmitriy V. Saveliev, Leonid Y. Fetisov[@], Vladimir I. Musatov, Mikhail V. Dzhabaridze

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: fetisovl@yandex.ru

Abstract

Objectives. The development of composite structures in which a strongly anisotropic magnetoelectric (ME) effect is observed is relevant for the creation of sensors that are sensitive to the direction of the magnetic field. Such an ME effect can arise due to the anisotropy of both the magnetic and the piezoelectric layers. In this work, a new anisotropic material named as a magnetostrictive fiber composite (MFC), comprising a set of nickel wires placed closely parallel to each other in one layer and immersed in a polymer matrix, is manufactured and studied. The study aimed to investigate the linear ME effect in a structure comprising of a new magnetic material, MFC, and lead zirconate titanate (PZT-19).

Methods. The magnetostriction for the MFC structure was measured using the strain-gauge method; the ME effect was determined by low-frequency magnetic field modulation.

Results. Structures with nickel wire diameters of 100, 150, and 200 μm were fabricated. The MFC magnetostriction field dependences were determined along with the frequency-, field-, and amplitude dependences of the ME voltage in the case of linear ME effect. Measurements were carried out at various values of the angle between the direction of the magnetic field and the wires. All samples demonstrated strong anisotropy with respect to the direction of the magnetic field. When the magnetic field orientation changes from parallel to perpendicular with respect to the nickel wire axes, the ME voltage decreases from its maximum value to zero.

Conclusions. The largest ME coefficient 1.71 V/(Oe $\cdot$ cm) was obtained for a structure made of MFC with a wire diameter of 150 μm . With increasing wire diameter, the resonance frequency increases from 3.5 to 6.5 kHz. The magnetostriction of the MFC is comparable in magnitude to that of a nickel plate having the same thickness.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetostriction, fiber composites, piezoelectric effect, anisotropy

• Submitted: 03.12.2021 • Revised: 15.02.2022 • Accepted: 20.04.2022

For citation: Saveliev D.V., Fetisov L.Y., Musatov V.I., Dzhabaridze M.V. Anisotropic magnetoelectric effect in lead zirconate titanate and magnetostrictive fiber composite structures. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):85–92. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-85-92>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в слоистых композитных структурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, позволяют осуществлять взаимное преобразование магнитных и электрических полей. Это, в свою очередь, дает возможность на их основе создавать датчики переменных и постоянных магнитных полей, автономные источники энергии, управляемые устройства электроники (индукторы и трансформаторы), антенны, новые типы магнитной памяти и др. [1–3]. МЭ эффекты в таких структурах

возникают в результате комбинации магнитоэлектрического эффекта в ФМ слое и пьезоэлектрического эффекта в ПЭ слое [4]. При помещении МЭ структуры во внешнее магнитное поле h ФМ слой деформируется вследствие магнитоэлектрического эффекта. Эти деформации передаются пьезоэлектрику через механическую связь между слоями, и он генерирует электрическое поле e вследствие пьезоэлектрического эффекта. Для описания эффективности МЭ эффекта был введен соответствующий коэффициент $\alpha_E = e/h = u/(b \cdot h)$, где b – толщина пьезоэлектрика; u – электрическое напряжение, генерируемое между электродами ПЭ слоя, возникающее под действием переменного магнитного поля h .

При изучении МЭ эффектов основное внимание уделялось их исследованию в изотропных слоистых композитных структурах, в которых величина эффекта не зависит от направления приложения магнитного поля H в плоскости таких структур. Однако в некоторых случаях, например, для датчиков магнитных полей, чувствительных к направлению магнитного поля, создание анизотропных МЭ композитов является актуальной задачей. Для решения этой задачи можно использовать либо ФМ слои с анизотропной магнитоотриксцией, либо ПЭ слои с анизотропным пьезоэффектом. Анизотропный МЭ эффект наблюдался в структурах, где в качестве магнитного слоя использовали монокристалл феррита кобальта CoFe_2O_4 [5], а в качестве ПЭ слоев – монокристалл магнионикобат-титанат свинца (PMN-PT) [6], никобат лития LiNbO_3 и фосфат галлия GaPO_4 [7]. Анизотропия магнитоотриксции может быть искусственно создана в процессе изготовления структуры. Также анизотропный МЭ эффект наблюдался в гетероструктурах, изготовленных из слоев пьезоэлектрической керамики цирконата-титаната свинца (ЦТС, $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 1$) и ФМ керамики CoFe_2O_4 . Одноосная магнитная анизотропия создавалась в ФМ слое такой структуры с помощью приложения внешнего давления к слою в процессе изготовления [8].

Анизотропия МЭ эффекта также наблюдалась в структурах, в которых использовали пьезоволоконные композиты (ПВК), изготовленные компанией Smart Materials Corporation (Сарасота, Флорида, США) [9, 10]. ПВК представляет собой набор стержней, изготовленных из пьезоэлектрической керамики, расположенных параллельно друг другу в плоскости и помещенных в полимерную матрицу. Этот материал получил широкое распространение из-за большого размера пьезоэлектрического модуля, гибкости и относительно низкой стоимости.

Недавно был предложен новый тип сильно анизотропного магнитного материала – магнитоотриксционные волоконные композиты (МВК). Они содержат набор проволок, изготовленных из магнитного

материала (аморфные микропровода или никель), расположенных параллельно друг другу на разном расстоянии и помещенные в полимерную матрицу [11, 12]. Использование такого материала в качестве ФМ слоя в слоистых композитах позволило получить сильно анизотропный МЭ эффект. Сильная анизотропия таких структур относительно направления внешнего магнитного поля (вдоль проволок или поперек) обусловлена размагничивающим фактором.

Авторами изготовлены несколько образцов МВК на основе проволок никеля разного диаметра и исследованы их магнитоотриксционные характеристики. Обнаружен и исследован сильно анизотропный МЭ эффект в структурах МВК–ЦТС. Получены частотные, полевые и угловые зависимости МЭ эффекта в таких композитных структурах.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Исследования МЭ эффекта проводили в двухслойных композитных структурах, содержащих слои различных МВК и пьезокерамики ЦТС. МВК представляет собой набор проволок никеля, расположенных параллельно и вплотную друг к другу в один слой и помещенных в полимерную матрицу. Было изготовлено три образца МВК с проволоками различного диаметра: 100 мкм (образец 1), 150 мкм (образец 2), 200 мкм (образец 3). В качестве матрицы использовали самополимеризующийся клей БФ-2 на основе формальдегидной смолы. Размеры структур в плоскости составляли соответственно $9.2 \times 8.9 \text{ мм}^2$, $9.7 \times 9.4 \text{ мм}^2$, $8.4 \times 8.3 \text{ мм}^2$. Толщины МВК равнялись диаметру проволок. Внешний вид МВК показан на рис. 1а. Магнитоотриксция всех МВК составляла $\sim 34 \cdot 10^{-6}$. При описании результатов измерений в работе использованы подстрочные индексы 1, 2 и 3, обозначающие МВК с диаметром проволоки 100 мкм, 150 мкм и 200 мкм соответственно.

В качестве ПЭ слоя были использованы коммерчески доступные диски ЦТС-19 (Audiowell Electronics (Guangzhou) Co. Ltd., Китай) состава $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$

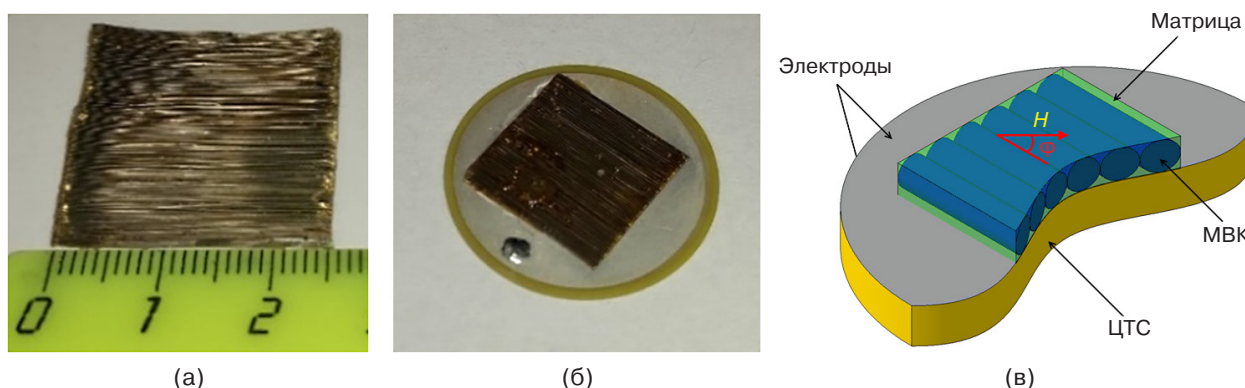


Рис. 1. Образцы МВК (а), ЦТС–МВК диаметром 150 мкм (б) и структура ЦТС–МВК (в)

диаметром 16 мм и толщиной 200 мкм. На противоположные стороны диска были нанесены серебряные электроды, и диск был поляризован в поперечном направлении. Фотографии изготовленных структур МВК и ЦТС–МВК приведены на рис. 1. Слои МВК и ЦТС были соединены с помощью цианакрилатного клея. Структуры подвешивали в магнитном поле в двух точках, расположенных на противоположных сторонах диска ЦТС, с помощью специального держателя, позволявшего поворачивать их относительно направления магнитного поля. Согласно принятой классификации композитов исследованные в работе структуры относятся к МЭ композитам со связностью «1–2» [13].

МЭ эффект в структурах исследовали методом низкочастотной модуляции магнитного поля на установке, описанной в работе [12]. Структуру помещали между полюсами электромагнита в постоянное магнитное поле H в диапазоне ± 1 кЭ, направленное в плоскости структуры. Электромагнит подключали к источнику питания TDK Lambda GENH600-1.3 (Япония). Возбуждающее переменное магнитное поле $h \cos(2\pi ft)$, амплитудой до $h = 0.8$ Э создавали с помощью катушек Гельмгольца, подключенных к генератору колебаний произвольной формы Agilent 33210A (Agilent Technologies, Санта-Клара, Калифорния, США). Поле h было параллельно полю H . Генерируемое между электродами пьезо-керамики МЭ напряжение $u(f)$ измеряли с помощью вольтметра АКИП 2401 (Китай) с входным сопротивлением 10 МОм при различных значениях f , h , φ , H и различных ориентациях H относительно оси проводов МВК. Зависимости магнитострикции МВК от магнитного поля при различных углах между направлением поля и направлением волокон измеряли тензометрическим методом с помощью оригинальной установки, описанной в работе [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала были исследованы полевые и угловые зависимости магнитострикции МВК. На рис. 2 приведены полевые зависимости магнитострикции МВК с различными диаметрами волокон для случая, когда магнитное поле направлено вдоль проволок. Видно, что в измеряемом диапазоне образцы 2 и 3 достигли насыщения $\sim (-34 \cdot 10^{-6})$, в то время как образец 1 имеет значение $\sim (-23 \cdot 10^{-6})$. Поскольку величина магнитострикции образца 1 не достигает насыщения, то далее в тексте оно будет называться максимальным. Магнитное поле насыщения уменьшается от более чем 1 кЭ до ~ 0.4 кЭ при увеличении диаметра волокон от 100 мкм до 200 мкм. При этом видно, что величина магнитострикции МВК на основе проволок диаметром 150 мкм растет быстрее, чем для

образца с толщиной проволоки 200 мкм. Влияние на величину магнитострикции, по-видимому, оказывают как размагничивающий фактор, так и механические напряжения со стороны матрицы.

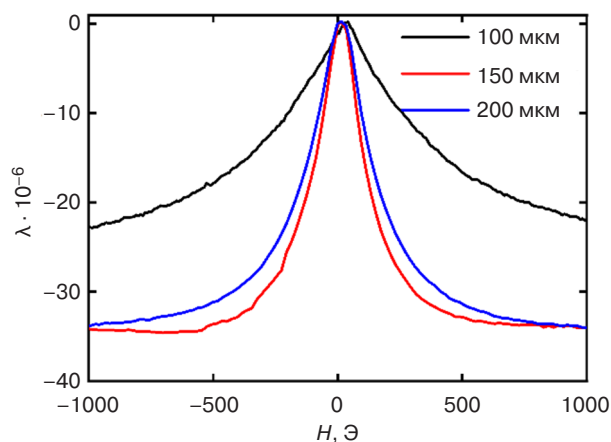


Рис. 2. Зависимость магнитострикции для изготовленных образцов МВК с различным диаметром проволоки от магнитного поля

На рис. 3 приведены измеренные зависимости максимальной магнитострикции от величины угла между направлением магнитного поля H и проволоками никеля в полях до 1 кЭ. Для всех образцов МВК наблюдалась сильная анизотропия относительно направления магнитного поля. Максимальная магнитострикция уменьшается практически до нулевого значения при увеличении угла между направлением магнитного поля и проволоками до 90° . Зависимость симметрична относительно нуля.

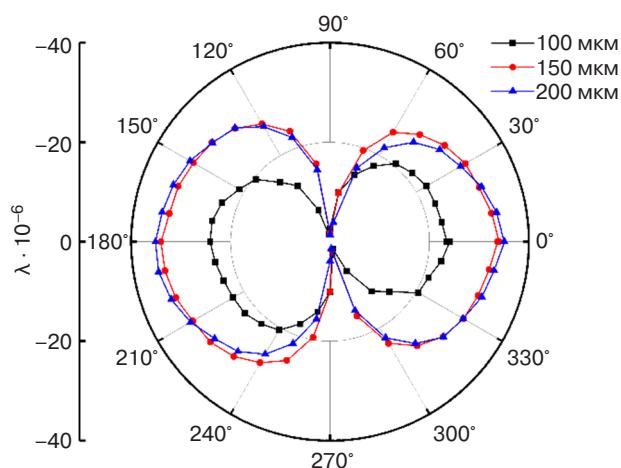


Рис. 3. Зависимость магнитострикции МВК от угла между направлением магнитного поля и направлением проволок для всех образцов

Далее были проведены измерения МЭ эффекта в структурах МВК–ЦТС. На рис. 4 приведены частотные зависимости МЭ напряжения $u(f)$, полученные для всех трех структур. Измерения проводили при $h \sim 0.75$ Э и оптимальных значениях напряженности

магнитного поля H_m (H_m – это поле, в котором значение МЭ напряжения максимально для каждого образца). Структуры намагничивали вдоль проволок никеля.

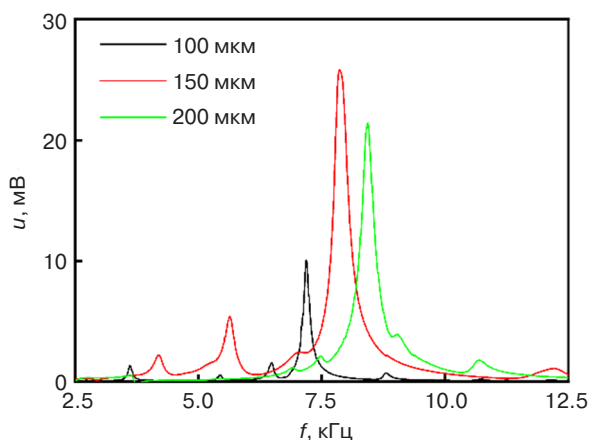


Рис. 4. Зависимость МЭ напряжения от частоты, измеренные в магнитном поле, направленном параллельно проволокам

На зависимостях видны пики на частотах изгибного резонанса структур. Для образца 1 высота пика составила $u_1 = 10.1$ мВ на частоте $f_1 \approx 7.2$ кГц, для образца 2: $u_2 = 25.9$ мВ на частоте $f_2 \approx 7.9$ кГц и для образца 3: $u_3 = 21.5$ мВ на частоте $f_3 \approx 8.4$ кГц. Видно, что резонансная частота структур растет с увеличением диаметра проволок МВК. Высоты пиков линейно росли с увеличением амплитуды возбуждающего поля h . Добротности резонансов составили $Q_1 \approx 72$, $Q_2 \approx 33$, $Q_3 \approx 32$. Для каждого пика были рассчитаны значения МЭ коэффициента по формуле $\alpha = u/(t \cdot h)$. Здесь u – амплитуда генерируемого структурой МЭ напряжения, t – толщина слоя ЦТС, h – амплитуда переменного магнитного поля. Рассчитанные величины МЭ коэффициентов на резонансных частотах составили $\alpha_1 = 0.61$ В/(Э · см), $\alpha_2 = 1.71$ В/(Э · см) и $\alpha_3 = 1.53$ В/(Э · см). Полученные коэффициенты сравнимы с коэффициентами, полученными в структурах ЦТС–никель [15], но существенно меньше МЭ коэффициентов $\alpha_E \sim 10^2$ В/(Э · см) для пленочных структур Metglas–AlN [16]. Параметры резонансов, полученные из данных рис. 3, приведены в таблице.

Таблица. Параметры резонансного МЭ эффекта в структурах ЦТС–МВК

Параметр	100 мкм	150 мкм	200 мкм
МЭ напряжение u , мВ	10.1	25.9	21.5
МЭ коэффициент α , В/(Э · см)	0.6	1.7	1.5
Частота резонанса f , кГц	7.2	7.9	8.4
Добротность Q	72	33	32

На рис. 5 приведены зависимости МЭ напряжения от магнитного поля H , направленного вдоль проволок. Измерения проводили на соответствующих резонансных частотах, характерных для каждого образца в переменном магнитном поле амплитудой $h = 0.75$ Э. Видно, что для всех образцов зависимости имели типичный вид: напряжение сначала растет с увеличением поля H , достигает максимума в поле H_m , соответствующем максимуму пьезомагнитного коэффициента ($q = dN/dH_{||}$), а затем падает практически до нуля при насыщении магнитоэлектрики. Величины полей H_m для каждого образца были разными и на начальном участке составляли $H_{m1} \approx 70$ Э, $H_{m2} \approx 50$ Э и $H_{m3} \approx 70$ Э соответственно. У всех кривых наблюдался гистерезис. Максимальные амплитуды напряжений соответствовали значениям, приведенным на рис. 4. Величины коэрцитивных полей H_c для образцов 1–3 составляли $H_{c1} = 45$ Э, $H_{c2} = 25$ Э и $H_{c3} = 35$ Э соответственно.

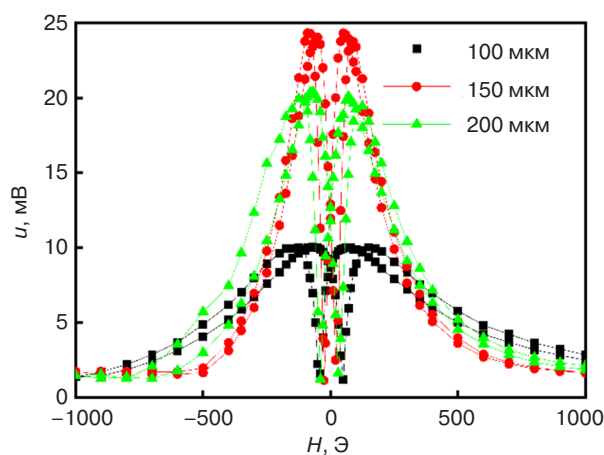


Рис. 5. Зависимость МЭ напряжения от магнитного поля H на частоте резонанса

На следующем этапе были исследованы зависимости МЭ эффекта от угла ϕ между направлением магнитного поля и осью проволок («угловые зависимости»), который изменяли в диапазоне от 0° до 360° . Измерения показали, что при увеличении этого угла величина максимального МЭ напряжения уменьшается и практически достигает нуля при $\phi = 90^\circ$, что соответствует угловым зависимостям магнитоэлектрики, приведенным на рис. 3. В то же время для каждого образца наблюдается увеличение значения магнитного поля H_m , при котором МЭ напряжение достигает максимального значения, что объясняется влиянием размагничивающего фактора. На основании полученных результатов были построены угловые диаграммы МЭ напряжения в поле H_m на частоте резонанса для всех исследованных образцов, приведенные на рис. 6. Видно, что формы зависимостей качественно совпадают для всех образцов. Максимальное значение напряжения наблюдалось при значении угла $\phi = 0^\circ$. При увеличении его значения до 90° МЭ напряжение

уменьшалось практически до нуля. Таким образом, все образцы обладают сильной анизотропией МЭ эффекта по отношению к направлению магнитного поля.

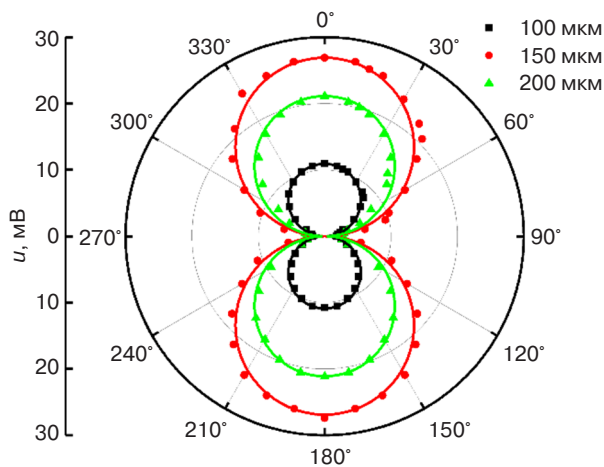


Рис. 6. Зависимости МЭ напряжения от угла между направлением магнитного поля и осью проволок

На рис. 7 приведены зависимости МЭ напряжения от амплитуды переменного магнитного поля, измеренные на частоте резонанса структур для параллельной ориентации поля H_m . Видно, что зависимости линейны во всем диапазоне амплитуд переменных магнитных полей. Чувствительность структур к магнитному полю u/h составила $u_1/h_1 \approx 12.4$ мВ/Э для структуры 1; $u_2/h_2 \approx 35.0$ мВ/Э – для структуры 2; $u_3/h_3 \approx 29.9$ мВ/Э – для структуры 3.

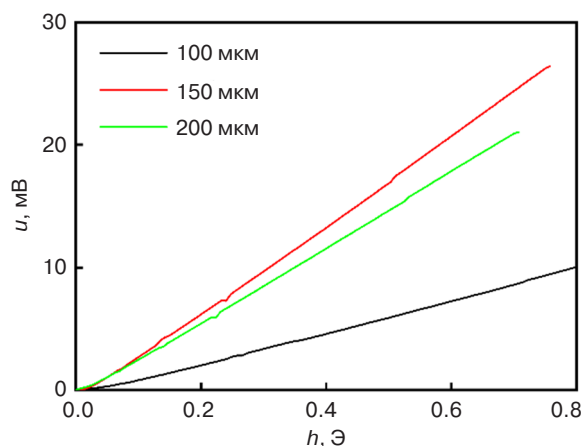


Рис. 7. Зависимости МЭ напряжения от амплитуды переменного магнитного поля для образцов на основе МВК различного диаметра

Частоты изгибных колебаний структуры в форме диска можно оценить, используя следующую формулу [17]:

$$f = k_{ns} \cdot \frac{a}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}}, \quad (1)$$

где k_{ns} – константа, n – количество узловых диаметров, s – количество узловых окружностей, a – толщина диска,

R – радиус диска, Y – модуль Юнга, ρ – плотность. Используя известные значения параметров материалов: $Y_m = 210$ ГПа, $\rho_m = 8.9 \cdot 10^3$ кг/м³, $Y_p = 59.5$ ГПа, $\rho_p = 7.4 \cdot 10^3$ кг/м³ и размеры структуры, получим значения частот $f_1 \approx 7$ кГц, $f_2 \approx 8.2$ кГц и $f_3 \approx 8.3$ кГц. Найденные частоты хорошо совпадают с измеренными. Расчеты показали, что резонансная частота растет с увеличением диаметра проволок никеля, что также согласуется с измерениями.

Амплитуда МЭ напряжения, генерируемого двухслойной структурой ФМ–ПЭ в линейном режиме, задается формулой [18, 19]:

$$u = A Q \frac{d_{31}}{\epsilon} q h, \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от размеров, механических и диэлектрических параметров слоев структуры, Q – акустическая добротность, d_{31} – пьезомодуль ПЭ слоя, $q = \lambda^{(1)} = \partial \lambda / \partial H|_H$ – пьезомагнитный коэффициент, $\lambda(H)$ – зависимость магнитострикции ФМ слоя от магнитного поля, а ϵ – диэлектрическая проницаемость ПЭ слоя. Из формулы (2) следует, что форма зависимости МЭ напряжения $u(H)$ от постоянного магнитного поля в значительной степени определяется полевой зависимостью $\lambda^{(1)}(H)$. Поэтому форма угловой зависимости МЭ напряжения совпадает с формой угловой зависимости магнитострикции МВК.

На рис. 8 приведены рассчитанные методом численного дифференцирования зависимости пьезомагнитного модуля q для трех образцов МВК, построенные по данным рис. 2. Максимумы пьезомагнитных модулей составили $q_1 \approx 0.06$ Э⁻¹, $q_2 \approx 0.21$ Э⁻¹ и $q_3 \approx 0.17$ Э⁻¹ в полях 60–80 Э. Видно, что максимальное значение соответствовало образцу с диаметром проволок 150 мкм, что, в свою очередь, привело к тому, что для данного образца наблюдается максимальное значение МЭ напряжения u (см. рис. 4).

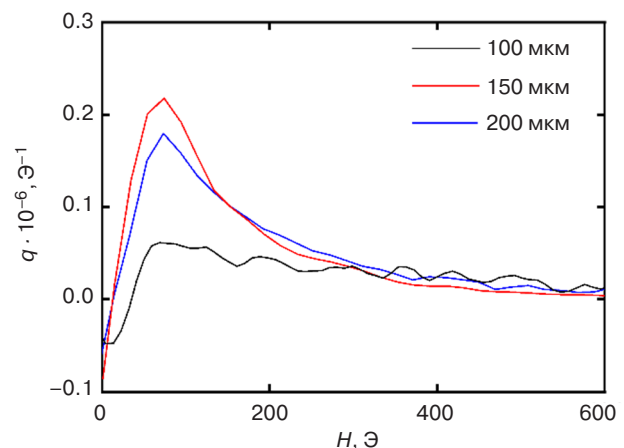


Рис. 8. Зависимость пьезомагнитного модуля МВК от магнитного поля для проволок различного диаметра

Анизотропия магнитоотрицательности МВК обусловлена размагничивающим фактором. Известно, что поле внутри ферромагнитного образца H_{in} в общем случае неоднородно и связано с внешним полем H как

$$H_{in} \approx H - N \cdot M(H_{in}), \quad (4)$$

где N – размагничивающий фактор, зависящий от формы образца и направления поля; M – усредненная намагниченность образца, зависящая от поля внутри ФМ слоя H_{in} [20]. Для длинного никелевого стержня при намагничивании его вдоль оси величина $N \approx 0$, а при намагничивании поперек оси – $N \approx 0.5$, т.е. при намагничивании никелевого стержня вдоль оси поле H_{in} практически равно H , а при намагничивании поперек оси поле H_{in} много меньше H . Поскольку величина магнитоотрицательности λ определяется именно внутренним полем H_{in} , для достижения максимального коэффициента $\lambda^{(1)}(H)$ при намагничивании никелевого стержня поперек оси следует приложить гораздо большее поле. Кроме того, в общем случае, необходимо учитывать диполь-дипольное взаимодействие между проводниками внутри матрицы, которое зависит от расстояния между ними.

Отметим, что такого рода структуры обладают большим преимуществом по сравнению с традиционными магнитными материалами. Характеристиками МЭ эффектов в них можно управлять, изменяя расстояние между проволоками МВК, их диаметр, материал проволок и матрицы. Эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обнаружен и исследован линейный МЭ эффект в двухслойных композитных структурах МВК–ЦТС. Образцы МВК представляют собой набор расположенных параллельно друг другу в один слой проволок никеля разного диаметра в полимерной матрице. Измерены частотные и полевые характеристики структур с проволоками диаметром

100–200 мкм на частоте изгибного резонанса. Показано, что частота резонанса растет от 7.2 кГц до 8.4 кГц с увеличением диаметра проволок. Наибольший МЭ коэффициент 1.7 В/(Э · см) получен для образца с диаметром проволок никеля 150 мкм и сопоставим с МЭ коэффициентом, полученным для структуры сравнимой толщины с ФМ слоем из поликристаллического никеля. Величина МЭ эффекта сильно зависит от ориентации постоянного магнитного поля H вследствие анизотропии магнитоотрицательности МВК.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 20-32-90-190.

Вклад авторов

Д.В. Савельев – описание методики исследования, подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, подготовка графических материалов, написание текста статьи.

Л.Ю. Фетисов – постановка задачи, описание методики исследования, подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, проверка данных, написание текста статьи.

В.И. Мусатов – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований, хранение данных, написание текста статьи.

М.В. Джапаридзе – подготовка исследуемых образцов и установок, проведение исследований.

Authors' contributions

D.V. Saveliev – description of the research methodology, preparing test samples and installations, conducting research, data curation, visualization, and writing the text of the article.

L.Y. Fetisov – conceptualization, description of the research methodology, preparing test samples and installations, conducting research, validation, and writing the text of the article.

V.I. Musatov – preparing test samples and installations, conducting research, data curation, and writing the text of the article.

M.V. Dzhabaridze – preparing test samples and installations and conducting research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives *Mater. Today*. 2014;17(269):269–275. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.05.004>
2. Liang X., Matyushov A., Hayes P., Schell L., Dong C., Chen H., He Y., Will-Cole A., Quandt E., Martins P., McCord J., Medarde M., Lanceros-Mendez S., van Dijken S., Sun N.X., Sort J. Roadmap on magnetoelectric materials and devices. *IEEE Trans. Mag.* 2021;57(8):400157. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3086635>
3. He Y., Luo B., Sun N.-X. Integrated magnetism and magnetoelectrics for sensing, power, RF, and microwave electronics. *IEEE J. Microw.* 2021;4:908–929. <https://doi.org/10.1109/JMW.2021.3109277>
4. Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status and future directions. *J. Appl. Phys.* 2008;103(3):031101. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
5. Oh Y.S., Crane S., Zheng H., Chu Y.H., Ramesh R., Kim K.H. Quantitative determination of anisotropic magnetoelectric coupling in $\text{BiFeO}_3\text{--CoFe}_2\text{O}_4$ nanostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2010;97(5):052902. <https://doi.org/10.1063/1.3475420>
6. Vargas J.M., Gómez J. In-plane anisotropic effect of magnetoelectric coupled PMN-PT/FePt multiferroic heterostructure: Static and microwave properties. *APL Mater.* 2014;2(10):106105. <https://doi.org/10.1063/1.4900815>

7. Vidal J.V., Timopheev A.A., Kholkin A.L., Sobolev N.A. Anisotropy of the magnetoelectric effects in tri-layered composites based on single-crystalline piezoelectrics. *Vacuum*. 2015;122(B):286–292. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.06.022>
8. Aubert A., Loyau V., Mazaleyrat F., LoBue M. Enhancement of the magnetoelectric effect in multiferroic $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{PZT}$ bilayer by induced uniaxial magnetic anisotropy. *IEEE Trans. Magn.* 2017;53(11):8109405. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2696162>
9. Bent A.A., Hagood N.W. Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 1997;8(11):903–919. <https://doi.org/10.1177/1045389X9700801101>
10. Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M. DC magnetic field sensing based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(37):375002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/37/375002>
11. Amirov A., Baraban I., Panina L., Rodionova V. Direct magnetoelectric effect in a sandwich structure of PZT and magnetostrictive amorphous microwires. *Materials*. 2020;13(4):916. <https://doi.org/10.3390/ma13040916>
12. Fetisov Y., Chashin D., Saveliev D., Fetisov L., Shamonin M. Anisotropic magnetoelectric effect in a planar heterostructure comprising piezoelectric ceramics and magnetostrictive fibrous composite. *Materials*. 2019;12(19):3228. <https://doi.org/10.3390/ma12193228>
13. Newnham R.E., Skinner D.P., Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mater. Res. Bull.* 1978;13(5):525–536. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(78\)90161-7](https://doi.org/10.1016/0025-5408(78)90161-7)
14. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Y., Ekonomov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates. *J. Siberian Federal Univ. Math. & Phys.* 2018;11(1):30–34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
15. Feng M., Wang J.-J., Hu J.-M., Wang J., Ma J., Li H.-B., Shem Y., Lin Y.-H., Chen L.-Q., Nan C.-W. Optimizing direct magnetoelectric coupling in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3/\text{Ni}$ multiferroic film heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(7):072901. <https://doi.org/10.1063/1.4913471>
16. Greve H., Woltermann E., Quenzer H.J., Wagner B., Quandt E. Giant magnetoelectric coefficients in $(\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10})_{78}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ -AlN thin film composites. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96(18):182501. <https://doi.org/10.1063/1.3377908>
17. Timoshenko S. *Vibration Problems in Engineering*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc.; 1961. 468 p.
18. Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Sreenivasulu G., Srinivasan G. Nonlinear resonant magnetoelectric interactions and efficient frequency doubling in a ferromagnetic-ferroelectric layered structure. *J. Appl. Phys.* 2013;113(11):116101. <https://doi.org/10.1063/1.4798579>
19. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric coupling in magnetostrictive-piezoelectric bilayers. *Phys. Rev. B*. 2003;68(5):054402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.054402>
20. Joseph R.I., Schlömann E. Demagnetizing field in nonellipsoidal bodies. *J. Appl. Phys.* 1965;36(5):1579–1593. <https://doi.org/10.1063/1.1703091>

Об авторах

Савельев Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Фетисов Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., доцент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

Мусатов Владимир Иванович, студент кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: musatov_vovak@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Джапаридзе Михаил Валерьевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Института перспективных технологий и промышленного программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mvd-1997@yandex.ru. Scopus Author ID 57395288400, <https://orcid.org/0000-0001-7714-2742>

About the authors

Dmitriy V. Saveliev, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dimsav94@gmail.com. Scopus Author ID 57196479660, ResearcherID D-8952-2019, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

Leonid Y. Fetisov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: fetisovl@yandex.ru. Scopus Author ID 26431336600, ResearcherID D-1163-2013, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

Vladimir I. Musatov, Student, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: musatov_vovak@mail.ru. Scopus Author ID 57416814900, <https://orcid.org/0000-0002-2995-8824>

Mikhail V. Dzhabaridze, Postgraduate Student, Department of Nanoelectronics Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mvd-1997@yandex.ru. Scopus Author ID 57395288400, <https://orcid.org/0000-0001-7714-2742>

УДК 620.193
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Современные подходы к снижению накипеобразования в теплообменном оборудовании

В.А. Головин¹,
С.А. Тюрина^{2, @},
В.А. Щелков¹

¹ Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,
Москва, 119071 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: mgupi.tyurina@mail.ru

Резюме

Цели. Процессы накипеобразования и коррозии являются серьезной проблемой для оборудования теплоэнергетического комплекса. Их активное развитие может полностью заблокировать работу системы, ускорить коррозию и привести к закупориванию, местным перегревам, прогарам и разрывам котлов и труб. Это, в свою очередь, может привести к катастрофическим последствиям и масштабным экологическим проблемам. Важной задачей является защита поверхностей от накипеобразования и коррозии. Перспективными методами предотвращения развития нежелательных последствий являются модификация состава полимерных покрытий за счет введения микрокапсулированных ингибиторов коррозии, а также поверхностная модификация, а именно, гидрофобизация поверхности полимерного покрытия. Целью работы являлся анализ методов снижения накипеобразования и скорости коррозионных процессов, а также исследование эффективности модификации лакокрасочных покрытий (ЛКП) посредством введения в их состав микрокапсулированных ингибиторов коррозии.

Методы. В работе использовались методы ускоренных коррозионных испытаний.

Результаты. Проанализированы существующие методы снижения накипеобразования и скорости коррозии на поверхностях теплоэнергетического оборудования. Исследована эффективность модифицирования защитных полимерных материалов за счет введения в их состав микрокапсул, содержащих активную фосфорную добавку, а также их поверхностное модифицирование.

Выводы. Установлено, что модифицирование ЛКП за счет применения микрокапсулированных активных добавок позволяет существенно снизить скорость как накипеобразования, так и развития коррозионных процессов. Внедрение современных методов модифицирования полимерных покрытий позволяет получать составы нового поколения, эффективным образом препятствующие накипеобразованию, развитию коррозионных процессов, и дает возможность сохранять высокую производительность теплообменного оборудования.

Ключевые слова: накипеобразование, коррозия, ингибирование, полимерные покрытия

• Поступила: 10.03.2022 • Доработана: 25.03.2022 • Принята к опубликованию: 28.04.2022

Для цитирования: Головин В.А., Тюрина С.А., Щелков В.А. Современные подходы к снижению накипеобразования в теплообменном оборудовании. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment

Vladimir A. Golovin ¹,
Svetlana A. Tyurina ^{2, @},
Vyacheslav A. Shchelkov ¹

¹ *Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia*

² *MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

@ *Corresponding author, e-mail: mgupi.tyurina@mail.ru*

Abstract

Objectives. Scale formation and corrosion are serious problems for heat and power equipment. These processes, when intense, can completely block the operation of the system, accelerating corrosion and leading to clogging, local overheating, and burnouts and ruptures of boilers and pipes, which in turn can lead to major environmental problems. Therefore, protecting surfaces from scale formation and corrosion is an important task. Promising methods for preventing the development of undesirable consequences include changing the composition of polymer coatings, e.g., by introducing microencapsulated corrosion inhibitors, as well as surface modification approaches, such as hydrophobization of the polymer coating surface. The purpose of the present work is to analyze methods for reducing scale formation and the rate of corrosion processes, as well as to study the efficiency of modification of paints and coatings by introducing microencapsulated corrosion inhibitors.

Methods. The study was based on the use of accelerated corrosion tests.

Results. Existing methods for reducing scale formation and corrosion rate on the surfaces of heat and power equipment were analyzed. The efficiency of modifying protective polymer materials by introducing microcapsules containing an active phosphonate additive was compared with approaches involving the surface modification of such protective materials.

Conclusions. It was determined that the modification of paints and coatings by introducing microencapsulated active additives can significantly reduce the rates of both scale formation and corrosion. By implementing state-of-the-art methods for modifying polymer coatings, a new generation of agents for efficiently preventing scale formation and corrosion processes can be developed for maintaining the high performance of heat-exchange equipment.

Keywords: scale formation, corrosion, inhibition, polymer coatings

• Submitted: 10.03.2022 • Revised: 25.03.2022 • Accepted: 28.04.2022

For citation: Golovin V.A., Tyurina S.A., Shchelkov V.A. Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Образование отложений на внутренней стороне теплопередающих поверхностей и их коррозия представляют собой серьезную проблему для тепло-энергетического производства. Типичной ситуацией является образование слоя отложений, включающих продукты коррозии металлов тракта водоохлаждения (циркуляционных, водяных камер и теплообменных трубок) и накипных отложений из воды (как находящихся в виде взвесей, так и растворенных солей). На начальной стадии происходит рост потребления топлива, снижение надежности, эффективности и работоспособности теплообменного оборудования и трубопроводов. В запущенной ситуации образование отложений может полностью заблокировать работу системы, ускорить коррозию и привести к закупориванию, локальным перегревам, прогарам и разрывам котлов и труб. Это в конечном итоге может привести к катастрофическим последствиям и экологическим проблемам [1, 2].

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ И СКОРОСТИ КОРРОЗИИ

В теплообменном аппарате, например, в главном конденсаторе пара турбины атомной электростанции (АЭС), число трубок может быть очень большим и достигать 100 000 шт. и более. Ремонт и восстановление подобных аппаратов представляет собой сложную техническую проблему. На сегодняшний день от 2 до 5% теплообменных трубок в конденсаторах пара непригодны к эксплуатации из-за коррозионного и эрозийного разрушения. В ходе проведенного на нескольких теплоэлектростанциях (ТЭС) и АЭС анализа коррозионного состояния [3] установлено, что еще на 30% трубок в ближайшее время велика вероятность образования сквозных коррозионных язв. Эти трубки придется заглушить, что приведет к недопустимому снижению коэффициента полезного действия (КПД) теплообменного оборудования.

Успешное решение проблемы накипеобразования обеспечит чистоту поверхностей систем водопользования, что позволит экономнее расходовать топливные и энергетические ресурсы, а также предотвратить возможные катастрофические последствия, связанные с ущербом для жизни и здоровья людей [4].

Для изготовления теплообменного оборудования энергетических систем в настоящее время широко используются медно-никелевые сплавы (МНЖ 5-1, ГОСТ 492-2006¹), латунь Л68 (ГОСТ 15527-2004²), нержавеющая сталь, титановые сплавы.

Условия развития коррозионных процессов в теплообменных аппаратах электростанций существенно различаются. Это определяется составом и температурой охлаждающей воды. На АЭС, как правило, используется природная пресная вода из прудов охладителей, рек или морская вода, а на ТЭС в основном используется обратное водоснабжение с охлаждением в градирнях, что позволяет использовать специальные, например, антинакипные добавки. Солеосодержание может существенно меняться в зависимости от сезона и условий подпитки прудов-охладителей и при этом в охлаждающей воде закрытых водоемов может составлять 100–3000 мг/л.

Исходя из опыта ремонта и обследования теплообменных трубок конденсаторов электростанций, можно сделать вывод, что основной причиной нарушения герметичности является именно развитие локальной коррозии. Отметим, что доля локальных коррозионных поражений составляет не менее 70% от общего объема дефектов. Несмотря на различие условий эксплуатации и использованных материалов теплообменников, коррозионные поражения являются, как правило, типовыми:

- разрушения трубок и трубных досок в зоне вальцовки вследствие коррозионно-эрозийного износа и биметаллической коррозии;
- развитие единичных коррозионных язв или кластеров язв, расположенных по всей длине внутренней поверхности трубок (со стороны охлаждающей жидкости). При этом язвы могут быть

¹ ГОСТ 492-2006. Межгосударственный стандарт. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. М.: Стандартинформ; 2011 [GOST 492-2006. Interstate Standard. Nickel, nickel and copper-nickel alloys treated by pressure. Grades. Moscow: Standartinform; 2011 (in Russ.).]

² ГОСТ 15527-2004. Межгосударственный стандарт. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004 [GOST 15527-2004. Interstate Standard. Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades. Moscow: IPK Izd. Standartov; 2004 (in Russ.).]

очень различны по размерам и глубине, вплоть до сквозных. Данный вид коррозионных поражений для трубок из медно-никелевых сплавов, латуней и нержавеющей сталей отмечен как в пресной, так и морской воде [5];

К основным видам коррозионных повреждений теплообменных труб можно отнести следующие:

- коррозионная язва с дальнейшим развитием в виде трещины по механизму коррозионного растрескивания под напряжением;
- скопления язв (питтингов), имеющих незначительные размеры и располагающиеся преимущественно в нижней части теплообменных труб;
- третинообразование по межкристаллитному, транскристаллитному и смешанному характеру;
- коррозия пятнами большой площади с незначительной глубиной.

В первую очередь, именно хлориды и сульфаты, являющиеся коррозионно-активными примесями в котловой воде парогенераторов, приводят к коррозионному растрескиванию металла теплообменных труб [6].

Необходимо отметить, что при циркуляции в системе часть воды испаряется в градирнях, с поверхности открытых прудов и очистных сооружений, в результате чего в ней увеличивается концентрация солей и накипеобразующих соединений. Значительное количество коррозионно-активных соединений, механические взвеси, а также микроорганизмы накапливаются в воде при многократном использовании. Все это вызывает интенсивное отложение накипи, приводящее к местному перегреву, коррозию конденсационно-холодильного оборудования, ухудшает теплопередачу, приводит к ослаблению механической прочности металла труб змеевиков и корпуса аппаратов.

Для снижения накипеобразования в водоопреснительных установках используется ряд методов, в частности:

- подкисление воды и применение антинакипинов;
- добавление зернистых присадок (затравок);
- контактная стабилизация;
- применение специальных конструкций испарителей с подвижными и самоочищающимися поверхностями теплообмена;
- магнитная, ультразвуковая и радиационная обработка питательной воды.

Выбор того или иного метода очистки внутренних поверхностей также определяется во многом видом отложений. Эти методы можно разделить на химические, механические и физические.

Химические способы удаления накипи при возможном одновременном ингибировании в различных технологических потоках осуществляются, как правило, посредством смешения химического

реагента для обработки с технологическим потоком. При этом обеспечивается обработка труднодоступных поверхностей.

Методы химической очистки, включающие в себя использование комплексообразователей и ингибиторов коррозии, обладают рядом существенных преимуществ перед перечисленными выше способами очистки и активно применяются. В источниках [7–9] подробно описано, как при использовании комплексообразователей нерастворимые отложения полностью или частично превращаются в соли или соединения, хорошо растворимые в воде.

Способы, при которых отложения переводят в вещество, которое не растворяется в воде, но способно растворяться в других химических реагентах, описаны в [10–12].

Согласно [13], в качестве водорастворимого ингибитора, позволяющего повысить эффективность противокоррозионной защиты и снизить интенсивность отложения солей, а также обеспечить защиту теплообменного оборудования из черных металлов от коррозионно-механического разрушения, рекомендуется применять композицию на основе триполифосфата натрия и азотсодержащего соединения (борат этаноламина). Установлено, что сочетание бората этаноламина и триполифосфата натрия (ТПФН) в определенном соотношении (ТПФН 10.0–20.0 мас. % / борат этаноламина 80.0–90.0 мас. %) приводит к возникновению синергетического эффекта усиления моющих, защитных и водовытесняющих свойств ингибитора.

Способ очистки, режимы очистки и применяемые реагенты выбираются на основе химического анализа отложений [14, 15]. Гидрофобизация является одним из основных методов управления поверхностными свойствами материалов [16–19].

Водоотталкивающая способность покрытий имеет большое значение во многих областях, таких как антикоррозионная защита, самоочищение, защита от обрастания, отделение масла от воды, антиобледенение, преобразование энергии, высвобождение лекарств, снижение сопротивления текучих жидкостей, антибактериальная адгезия, производство противообрастающих красок для лодок, ветровых стекол, архитектурных покрытий и т.д. [20, 21].

Кроме непосредственно гидрофобных выделяют также особую группу супергидрофобных покрытий. Бионические супергидрофобные (англ. superhydrophobic coating, SHPC) поверхности привлекают внимание благодаря своим характеристикам и возможностям применения. В природе супергидрофобными свойствами обладают поверхности некоторых растений и животных. Это листья лотоса и риса, шкура акулы, лапка геккона, крыло бабочки, перья пингвинов и т.д. [22, 23].

Уменьшенное межфазное натяжение или повышенная гидроизоляция металлов, обеспечиваемые супергидрофобными поверхностями, являются действенным средством решения задачи снижения скорости коррозии металлов. При этом следует отметить, что сохранение слоя воздуха в качестве барьера между супергидрофобной металлической подложкой и жидкостью ограничивает площадь контакта между жидкостями и поверхностью [24, 25], что значительно снизит теплопередачу. Гидрофобные поверхности могут быть получены путем создания специфической иерархической шероховатости поверхности либо путем нанесения на подложку материалов с низкой поверхностной энергией. Эти подходы могут быть использованы как по отдельности, так и вместе [26, 27].

Супергидрофобные покрытия, получаемые с использованием физической адсорбции, не обладают долговечностью из-за слабого физического взаимодействия [28]. Высокие значения энергии взаимодействия с материалом характерны для покрытий, получаемых с химической адсорбцией гидрофобных агентов.

Также следует отметить, что кривизна поверхности является одним из управляющих факторов. Установлено, что угол смачивания на цилиндрических и сферических поверхностях больше, чем на гладкой поверхности, а вот на вогнутых поверхностях (нанопоры, сферические полости) угол смачивания имеет меньшее значение, чем на плоской поверхности, имеющей тот же химический состав [29].

В Массачусетском технологическом институте (США) разработан способ покрытия поверхностей конденсирующего устройства слоем графена толщиной в один атом. Испытания в среде водяного пара при 100 °С показали, что данное покрытие обеспечило переход от пленочной к капельной конденсации и повысило теплопередачу в 4 раза по сравнению с металлическими поверхностями, где конденсат формировал слой воды.

Недолговечность большинства искусственных супергидрофобных поверхностей не дает возможности их широкого использования в промышленности. Эти поверхности склонны утрачивать супергидрофобность под действием агрессивной среды или механического воздействия. Поэтому для расширения области применения супергидрофобных поверхностей решение этих проблем представляется крайне важным.

Говоря о создании противонакипных покрытий, следует отметить сложность обеспечения следующих свойств: термодинамически устойчивого гетерогенного режима смачивания поверхности, химической стойкости, высокой адгезии к подложке, устойчивости к истиранию. Именно эти свойства обеспечивают долговечность покрытия в процессе эксплуатации.

Несмотря на отмеченные недостатки и сложности получения супергидрофобных поверхностей, использование отработанных методов и супергидрофобных добавок может быть крайне полезным для защиты теплообменного оборудования от накипеобразования и коррозии.

Эффективным методом защиты и восстановления трубок теплообменного оборудования является нанесение защитного полимерного покрытия на внутреннюю поверхность теплообменной трубки. В настоящее время этот метод активно используется. Это связано как с успешной разработкой полимерных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, так и с развитием технологии окраски, позволяющей за один проход наносить сверхтонкое покрытие на неповрежденную поверхность трубки, одновременно устанавливая надежные полимерные прокладки в местах образования как сквозных, так и несквозных коррозионных язв [30].

Переход от металлических теплопередающих поверхностей к металлополимерным происходит путем нанесения композиционного полимерного покрытия на внутреннюю поверхность металлической трубки. Эффективность этого перехода определяется:

- существенным повышением долговечности трубной системы с покрытием за счет высокой химической и абразивной стойкости полимерных покрытий;
- блокированием центров коррозии, которые могут являться центрами накипеобразования;
- существенно более низким значением адгезии накипных отложений к поверхности полимера, нежели к металлу самой трубки. Это обуславливается большей гладкостью поверхности покрытия (особенно в сравнении с поверхностью трубки с коррозионными язвами), а также меньшей полярностью инертной поверхности полимера (по сравнению с поверхностью окисленного металла) и, следовательно, отсутствием условий для химической привязки накипных отложений;
- возможностью направленной модификации поверхностного слоя для придания поверхности дополнительных антинакипных свойств.

К полимерным материалам для покрытия теплообменных поверхностей конденсаторов турбин предъявляются следующие требования:

- рабочая температура при нормальной эксплуатации от 0 °С до +40 °С с возможностью кратковременного прогрева до +240 °С;
- толщина покрытия не более 50–60 мкм, исходя из требований минимального воздействия на теплопередачу при коэффициенте теплопроводности материала покрытия в диапазоне 1–2 Вт/(м · К);
- коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) должен быть близким к КЛТР металла;

- материал должен обладать адгезионной прочностью к стали от 50–60 МПа (метод нормального отрыва) и сохранять ее в условиях эксплуатации;
- проявлять стойкость к абразивному износу с концентрацией абразива 3–5% в потоке воды, чтобы противостоять истиранию дисперсными частицами;
- покрытие должно быть ровным, глянцевым, без подтеков и наплывов;
- материал должен быть технологичным и недорогим.

Большинство выпускаемых полимерных материалов обладают отдельными необходимыми характеристиками. Часть полимеров имеют ограничение по температуре эксплуатации, другие полимеры имеют высокую вязкость, обуславливающую невозможность нанесения полимерного материала тонким слоем на металлическую подложку. Если покрытие имеет чрезмерную толщину, то это неизбежно приводит к росту термического сопротивления. Полимерные материалы существенно отличаются также термической и химической стойкостью, уровнем адгезии к различным металлам.

Несмотря на все сложности, в настоящее время для защиты поверхности теплообменного оборудования используется широкий ассортимент полимерных материалов. Однако важно отметить, что большинство из них нуждается в модификации, которая может заключаться в гидрофобизации поверхности, а также в повышении теплопроводности и уровня адгезионной прочности, улучшении термической и химической стойкости, стойкости к истиранию и т.д.

Научным коллективом лаборатории защиты металлов и сплавов от коррозии в сильно агрессивных средах Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина получен успешный опыт снижения накипеобразования посредством введения модифицирующих (антинакипных) добавок как в состав полимерного противокоррозионного покрытия в форме микрокапсул, так и на его поверхность.

Микрокапсулы имеют форму сферы с фосфатной модифицирующей добавкой внутри. Стенки выполнены из эпоксидного полимерного материала. В процессе проникновения среды в стенки микрокапсул происходит постепенное вымывание модифицирующих добавок. Микрокапсулы значительно повышают как коррозионную стойкость, так и способствуют пролонгированному антинакипному действию модифицирующих добавок [31–34].

Результаты испытаний показали, что адгезия слоя накипи к модифицированным полимерным покрытиям сохраняется очень низкой. Данный факт приводит к самопроизвольному отслоению и растрескиванию накипи при незначительных внешних



Рис. 1. Фотография образца после испытаний на накипеобразование. Верхняя часть образца защищена полимерным покрытием

воздействиях или изменениях технологических параметров (рис. 1).

Как показал опыт промышленных испытаний, указанный тип покрытий обеспечивает минимальные отложения на трубных досках и входных участках теплообменных трубок конденсаторов пара ТЭЦ и АЭС при длительной эксплуатации.

Важно отметить, что модифицированные покрытия обладают высокой абразивостойкостью (концентрация песка в пульпе 5%, скорость потока 3 м/с), что позволяет использовать их для работы с системами шарикоочистки. Скорость износа составила менее 0.5 мкм за 1000 часов. Это позволит обеспечить срок службы покрытия толщиной 50 мкм более 10 лет.

На Балаковской АЭС при нанесении покрытий предотвращено образование накипи и отложений в теплообменных трубках в течение 4 лет. Важно отметить, что в покрытии не наблюдается никаких внешних повреждений, отслоений и трещин. При этом цвет и блеск поверхности покрытия сохранен, и антинакипные свойства покрытия позволили перейти к периодической работе системы шарикоочистки [35].

Положительные результаты получены при нанесении модифицированных покрытий сетевого водонагревателя на Хабаровской ТЭЦ. До нанесения покрытий на трубных досках и внутренней поверхности трубок горизонтального водонагревателя сетевой воды (подогреватель сетевой горизонтальный, ПСГ) фиксировалось интенсивное образование слоя отложений продуктов коррозии питающего водовода. После нанесения полимерного покрытия на участки трубных досок и внутреннюю поверхность пучков теплообменных трубок защищенные теплообменные поверхности спустя 7 месяцев эксплуатации при температуре до 140 °С сохранили исходное состояние без видимых отложений (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид защитного покрытия участка трубной доски и пучка окрашенных трубок ПСГ Хабаровской ТЭЦ спустя 7 месяцев эксплуатации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение современных методов модифицирования полимерных покрытий за счет применения фосфонатных микрокапсулированных активных добавок позволяет получать составы нового поколения, эффективно препятствующие накипеобразованию, развитию коррозионных процессов. При

этом обеспечивается возможность сохранения высокой производительности теплообменного оборудования. Помимо высокой функциональности защитных покрытий, следует отметить доступность сырья и экономическую целесообразность внедрения представленного подхода с целью снижения накипеобразования в теплообменном оборудовании. Минимальный срок безотказной службы в разработанных защитных полимерных покрытиях оценивается в 10 лет.

Вклад авторов

В.А. Головин – концептуализация, разработка методологии, проведение исследования, сбор данных, научное редактирование.

С.А. Тюрина – сбор данных, проведение исследования, написание и редактирование текста статьи.

В.А. Щелков – сбор данных, проведение исследования.

Authors' contributions

V.A. Golovin – concept and methodology development, conducting research, collecting data, and scientific editing.

S.A. Tyurina – collecting data, conducting research, writing and editing the text of the article.

V.A. Shchelkov – methodology development, collecting data, and conducting research.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saremi M., Dehghanian C., Sabet M. The effect of molybdate concentration and hydrodynamic effect on mild steel corrosion inhibition in simulated cooling water. *Corros. Sci.* 2006;48(6):1404–1412. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.009>
2. *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*: 8th ed. BETZ Laboratories Inc., USA; 1980. 440 p.
3. *Материалы конференции начальников турбинных цехов российских и зарубежных АЭС по повышению надежности и эффективности турбинного оборудования НТЦ-2013*. Москва; 2013.
4. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu. J. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Appl. Therm. Eng.* 2006;26(4):440–447. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.05.021>
5. Головин В.А., Печников Н.В., Щелков В.А., Цивадзе А.Ю. Оценка срока эксплуатации теплообменных трубок конденсаторов пара на основе статистического анализа локальной язвенной коррозии по данным вихретокового контроля. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018;54(45):14–26. <https://doi.org/10.1134/S004418561806013X>
6. Zhang H.H., Pang X., Meng Z., Chao L., Liang W., Gao K. The behavior of pre-corrosion effect on the performance of imidazoline-based inhibitor in 3 wt % NaCl solution saturated with CO₂. *Appl. Surf. Sci.* 2015;356:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.003>

REFERENCES

1. Saremi M., Dehghanian C., Sabet M. The effect of molybdate concentration and hydrodynamic effect on mild steel corrosion inhibition in simulated cooling water. *Corros. Sci.* 2006;48(6):1404–1412. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.009>
2. *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*: 8th ed. BETZ Laboratories Inc., USA; 1980. 440 p.
3. *Materialy konferentsii nachal'nikov turbinnykh tsekhov rossiiskikh i zarubezhnykh AES po povysheniyu nadezhnosti i effektivnosti turbinного oborudovaniya NTTs 2013 (Materials of the conference of heads of turbine shops of Russian and foreign NPPs on improving the reliability and efficiency of turbine equipment STC 2013)*. Moscow; 2013 (in Russ.).
4. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu. J. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Appl. Therm. Eng.* 2006;26(4):440–447. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.05.021>
5. Golovin V.A., Pechnikov N.V., Shchelkov V.A., Tsivadze A.Yu. Evaluation of the service life of heat exchange tubes of steam condensers based on statistical analysis of local ulcerative corrosion according to eddy current control data. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physical chemistry of the surface and protection of materials*. 2018. Vol. 54. P. 14–26 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S004418561806013X>

7. Avdeev Y.G., Kuznetsov Y.I. Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2020;9(2): 394–426. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-2>
8. Бовт В.В., Миков А.И. Композиция на основе нитрата карбамида и способ получения композиции на основе нитрата карбамида: Пат. 2497941 РФ. Заявка № 201204930/04; заявл. 13.02.2012; опубл. 10.11.2013. Бюл. 31.
9. Аптекман А.Г., Беклемышев В.И., Болгов В.Ю., Махонин И.И. Промывочный состав для удаления накипи: Пат. 2172301 РФ. Заявка № 2000110279/12; заявл. 25.04.2000; опубл. 20.08.2001. Бюл. 23.
10. Алиев З.М., Магомедова Д.Ш., Супьянова Э.А., Ялдаров Э.М. Исследование электрохимически синтезированного анолита для очистки внутренних трубопроводов от накипи. *Вестник Дагестанского государственного университета*. 2014;6:148–150.
11. Линников О.Д., Родина И.В., Анохина Е.А. и др. Способ очистки оборудования от отложений с высоким содержанием меди: Пат. 2359196 РФ. Заявка № 2007134131/02; заявл. 12.09.2007; опубл. 20.06.2009. Бюл. № 17.
12. Ахмедов Г.Я. Способ очистки теплообменника от карбонатных отложений: Пат. 2528776 РФ. Заявка № 2013109835/06; заявл. 05.03.2013; опубл. 20.09.2014. Бюл. 26.
13. Гайдар С.М. Водорастворимый ингибитор коррозии металлов: Пат. 2355820 РФ. Заявка № 2008113753/02; заявл. 11.04.2008; опубл. 20.05.2009. Бюл. 14.
14. Артамонова И.В., Горичев И.Г. Экологические особенности удаления карбонатных отложений с поверхности теплотехнического оборудования. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009;8(2):220–227.
15. Шагиев Н.Г., Чичирова Н.Д., Абасев Ю.В., Ляпин А.И. Термодинамический анализ процессов в водных контурах электростанций при химических очистках с использованием композиций на основе комплексонов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2003;(11–12):82–88.
16. Zhang P., Lv F.Y. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*. 2015;82:1068–1087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.061>
17. Barati D.G., Aliofkhaezrai M., Khorsand S., Sokhanvar S., Kaboli A. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arab. J. Chem.* 2020;13(1):1763–1802. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>
18. Latthe S.S., Sutar R.S., Kodag V.S., Bhosale A.K., Kumar A.M., Kumar Sadasivuni K., Xing R., Liu S. Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications. *Prog. Org. Coat.* 2019;128:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.008>
19. Cao L., Jones A.K., Sikka V.K., Wu J., Gao D. Anti-Icing superhydrophobic coatings. *Langmuir*. 2009;25(21): 12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>
20. Mehmood U., Al-Sulaiman F.A., Yilbas B.S., Salhi B., Ahmed S.H.A., Hossain M.K. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: a critical review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2016;157:604–623. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>
6. Zhang H.H., Pang X., Meng Z., Chao L., Liang W., Gao K. The behavior of pre-corrosion effect on the performance of imidazoline-based inhibitor in 3 wt % NaCl solution saturated with CO₂. *Appl. Surf. Sci.* 2015;356:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.003>
7. Avdeev Y.G., Kuznetsov Y.I. Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2020;9(2): 394–426. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-2>
8. Bovt V.V., Mikov A.I. Kompozitsiya na osnove nitrata karbamida i sposob polucheniya kompozitsii na osnove nitrata karbamida (Composition based on carbamide nitrate and method for producing a composition based on carbamide nitrate): RF Pat. 2497941. Publ. 10.11.2013 (in Russ.).
9. Aptekman A.G., Beklemyshev V.I., Bolgov V.Yu., Makhonin I.I. Promyvochnyi sostav dlya udaleniya nakipi (Flushing composition for descaling): RF Pat. 2172301. Publ. 20.08.2001 (in Russ.).
10. Aliev Z.M., Magomedova D.Sh., Sup'yanova E.A., Yaldarov E.M. Using electrochemically synthesized anolyte for cleaning internal surfaces of pipelines from scale. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta = Herald of Dagestan State University*. 2014;6:148–150 (in Russ.).
11. Linnikov O.D., Rodina I.V., Anokhina E.A., et al. Sposob ochistki oborudovaniya ot otlozhenii s vysokim soderzhanie medi (Method for cleaning equipment from deposits with a high copper content): RF Pat. 2359196. Publ. 20.06.2009 (in Russ.).
12. Akhmedov G.Ya. Sposob ochistki teploobmennika ot karbonatnykh otlozhenii (Method for cleaning the heat exchanger from carbonate deposits) RF Pat. 2528776. Publ. 20.09.2014 (in Russ.).
13. Gaidar S.M. Vodorastvorimyi ingibitor korrozii metallov (Water-soluble metals corrosion inhibitor): RF Pat. 2355820. Publ. 20.05.2009 (in Russ.).
14. Artamonova I.V., Gorichev I.G. Ecological features of carbonate deposit removal from the surface of manufacturing equipment. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2009;8(2):220–227 (in Russ.).
15. Shagiev N.G., Chichirova N.D., Abasev Yu.V., Lyapin A.I. Thermodynamic analysis of processes in water contours of power stations at chemical clearing with use of compositions based on a complexons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy Energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2003;(11–12):82–88 (in Russ.).
16. Zhang P., Lv F.Y. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*. 2015;82:1068–1087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.061>
17. Barati D.G., Aliofkhaezrai M., Khorsand S., Sokhanvar S., Kaboli A. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arab. J. Chem.* 2020;13(1): 1763–1802. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>
18. Latthe S.S., Sutar R.S., Kodag V.S., Bhosale A.K., Kumar A.M., Kumar Sadasivuni K., Xing R., Liu S. Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications. *Prog. Org. Coat.* 2019;128:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.008>

21. Gwon H.J., Park Y., Moon C.W., Nahm S., Yoon S.J., Kim S.Y., Jang H.W. Superhydrophobic and antireflective nanoglass-coated glass for high performance solar cells. *Nano Res.* 2014;7(5):670–678. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0427-x>
22. Gao X.F., Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature.* 2004;432(7013):36. <https://doi.org/10.1038/432036a>
23. Gao X., Yan X., Yao X., Xu L., Zhang J., Zhang K., Yang B., Jiang L. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Adv. Mater.* 2007;19(17):2213–2217. <https://doi.org/10.1002/adma.200601946>
24. Liu T., Chen S.G., Cheng S., Tian J.T., Chang X.T., Yin Y.S. Corrosion behavior of super-hydrophobic surface on copper in seawater. *Electrochim. Acta.* 2007;52(28):8003–8007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.072>
25. Yin Y.S., Liu T., Chen S.G., Liu T., Cheng S. Structure stability and corrosion inhibition of super-hydrophobic film on aluminum in seawater. *Appl. Surf. Sci.* 2008;255(5):2978–2984. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.088>
26. Hooda A., Goyat M.S., Pandey J.K., Kumar A., Gupta R. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of super-hydrophobic coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020;142:105557. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557>
27. Wang G., Zhang T.Y. Easy route to the wettability cycling of copper surface between superhydrophobicity and superhydrophilicity. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2012;4(1):273–279. <https://doi.org/10.1021/am2013129>
28. Mortazavi V., Khonsari M. On the degradation of superhydrophobic surfaces: a review. *Wear.* 2017;372–373:145–157. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.009>
29. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2011;383(1–3):10–16. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.020>
30. Golovin V.A., Kaz'min A.N., Nemytova A.M. Experience gained from using protective coating of cooling tubes in the condensers at the Leningrad and the Smolensk nuclear power plants. *Term. Eng.* 2012;59(2):119–124. <https://doi.org/10.1134/S0040601512020048>
31. Ильин А.Б., Щелков В.А., Добрян С.А., Лукин В.Б., Головин В.А. Полимерные покрытия для защиты теплообменных трубок конденсаторов пара от коррозии и солеотложений. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2018;5(71):69–75. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.71.037>
32. Головин В.А. Предотвращение накипеобразования и коррозии теплопередающих поверхностей конденсаторов АЭС. *Труды конференции начальников турбинных цехов российских и зарубежных АЭС по повышению надежности и эффективности турбинного оборудования.* АО «Концерн Росэнергоатом», 13–15 февраля 2018.
19. Cao L., Jones A.K., Sikka V.K., Wu J., Gao D. Anti-Icing superhydrophobic coatings. *Langmuir.* 2009;25(21):12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>
20. Mehmood U., Al-Sulaiman F.A., Yilbas B.S., Salhi B., Ahmed S.H.A., Hossain M.K. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: a critical review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2016;157:604–623. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>
21. Gwon H.J., Park Y., Moon C.W., Nahm S., Yoon S.J., Kim S.Y., Jang H.W. Superhydrophobic and antireflective nanoglass-coated glass for high performance solar cells. *Nano Res.* 2014;7(5):670–678. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0427-x>
22. Gao X.F., Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature.* 2004;432(7013):36. <https://doi.org/10.1038/432036a>
23. Gao X., Yan X., Yao X., Xu L., Zhang J., Zhang K., Yang B., Jiang L. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Adv. Mater.* 2007;19(17):2213–2217. <https://doi.org/10.1002/adma.200601946>
24. Liu T., Chen S.G., Cheng S., Tian J.T., Chang X.T., Yin Y.S. Corrosion behavior of super-hydrophobic surface on copper in seawater. *Electrochim. Acta.* 2007;52(28):8003–8007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.072>
25. Yin Y.S., Liu T., Chen S.G., Liu T., Cheng S. Structure stability and corrosion inhibition of super-hydrophobic film on aluminum in seawater. *Appl. Surf. Sci.* 2008;255(5):2978–2984. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.088>
26. Hooda A., Goyat M.S., Pandey J.K., Kumar A., Gupta R. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of super-hydrophobic coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020;142:105557. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557>
27. Wang G., Zhang T.Y. Easy route to the wettability cycling of copper surface between superhydrophobicity and superhydrophilicity. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2012;4(1):273–279. <https://doi.org/10.1021/am2013129>
28. Mortazavi V., Khonsari M. On the degradation of superhydrophobic surfaces: a review. *Wear.* 2017;372–373:145–157. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.009>
29. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2011;383(1–3):10–16. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.020>
30. Golovin V.A., Kaz'min A.N., Nemytova A.M. Experience gained from using protective coating of cooling tubes in the condensers at the Leningrad and the Smolensk nuclear power plants. *Term. Eng.* 2012;59(2):119–124. <https://doi.org/10.1134/S0040601512020048>
31. Ilyin A.B., Shchelkov V.A., Dobriyan S.A., Lukin V.B., Golovin V.A. Polymer coatings for protection of heat-exchange tubes of vapor condenser against corrosion and saltation. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal.* 2018;5(71):69–75 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.71.037>
32. Golovin V.A. Prevention of scale formation and corrosion of heat transfer surfaces of NPP condensers. In: *Proceeding of Conference of Heads of Turbine Shops of Russian and Foreign NPPs on Improving the Reliability and Efficiency of Turbine Equipment.* Rosenergoatom Concern JSC, February 13–15, 2018 (in Russ.)

33. Головин В.А., Ильин А.Б., Кузнец В.Т., Вартапетян А.Р. Способ защиты от коррозии металлических поверхностей ингибированными полимерными композициями и микрокапсулы с ингибитором коррозии: Пат. 2358036 РФ. Заявка № 2007148024/02; заявл. 25.12.2007; опубл. 10.06.2009.
34. Golovin V.A., Kuznets V.T., Kublitsky K.V., Ilin A.B. Method for protection against corrosion and scale deposit and for restoring tubes of heat-exchanging equipment and device for carrying out said method: US Pat. 7836844. Publ. 23.11.2010.
35. Головин В.А., Ильин А.Б., Алиев А.Д. Диффузия фосфоновых ингибиторов накипеобразования в эпоксидных матрицах. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;70(4):92–96. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.70.033>
33. Golovin V.A., Il'in A.B., Kuznec V.T., Vartapetjan A.R. *Sposob zashchity ot korrozii metallicheskih poverhnostej ingibirovannymi polimernymi kompozicijami i mikroapsuly s ingibitorom korrozii (Method of protecting metal surfaces inhibited with polymer compositions from corrosion and micro-capsules with a corrosion inhibitor (versions))*: RF Pat. 2358036. Publ. 10.06.2009 (in Russ.).
34. Golovin V.A., Kuznets V.T., Kublitsky K.V., Ilin A.B. Method for protection against corrosion and scale deposit and for restoring tubes of heat-exchanging equipment and device for carrying out said method: US Pat. 7836844. Publ. 23.11.2010.
35. Golovin V.A., Ilyin A.B., Aliev A.D. Diffusion of phosphonic scale inhibitors for scale in epoxy matrices. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2018;70(4):92–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.70.033>

Об авторах

Головин Владимир Анатольевич, д.т.н., заведующий лабораторией защиты от коррозии металлов и сплавов в сильноагрессивных средах, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4). E-mail: golovin@rocor.ru. Scopus Author ID 7006124188, ResearcherID S-1645-2018, <https://orcid.org/0000-0001-9144-507X>

Тюрина Светлана Александровна, к.т.н., доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mgupi.tyurina@mail.ru. Scopus Author ID 57209980191, ResearcherID AGI-3957-2022, <https://orcid.org/0000-0002-6671-1337>

Щелков Вячеслав Анатольевич, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории защиты от коррозии металлов и сплавов в сильноагрессивных средах, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4). E-mail: tehnolog@rocor.ru. Scopus Author ID 6506074251, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5305>

About the authors

Vladimir A. Golovin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Metal and Alloy Protection from Corrosion in Highly Aggressive Media, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31-4, Leninskii pr., Moscow, 119071 Russia). E-mail: golovin@corrosion.ru. Scopus Author ID 7006124188, ResearcherID S-1645-2018, <https://orcid.org/0000-0001-9144-507X>

Svetlana A. Tyurina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Digital and Additive Technologies, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mgupi.tyurina@mail.ru. Scopus Author ID 57209980191, ResearcherID AGI-3957-2022, <https://orcid.org/0000-0002-6671-1337>

Vyacheslav A. Shchelkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Metal and Alloy Protection from Corrosion in Highly Aggressive Media, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31-4, Leninskii pr., Moscow, 119071 Russia). E-mail: tehnolog@rocor.ru. Scopus Author ID 6506074251, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5305>

УДК 628.95
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование и разработка импульсных электронных пускорегулирующих аппаратов в комплекте с ультрафиолетовыми лампами

О.Ю. Коваленко ¹, С.А. Микаева ^{2, @}, Ю.А. Журавлёва ²

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, 430005 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: mikaeva_s@mirea.ru

Резюме

Цели. В облучательных приборах, работающих в светотехнических установках с трубчатыми ультрафиолетовыми (УФ) лампами низкого давления, к электронным пускорегулирующим аппаратам (ЭПРА) предъявляются следующие требования: невысокая стоимость, обеспечение надежного зажигания разрядных ламп низкого давления в условиях пониженных температур и надежная работа ламп при повышенной энергетической эффективности. По сравнению с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами, ЭПРА обеспечивают повышение светотдачи разрядных ламп и коэффициента мощности, снижение расхода дефицитных материалов, уменьшение массы. Для повышения энергетической эффективности УФ ламп в комплекте с ними целесообразно использовать импульсные ЭПРА, обеспечивающие питание на частоте 22–50 кГц. Различные схемные решения ЭПРА включают в себя такие основные узлы как сетевой фильтр, выпрямитель, корректор коэффициента мощности, сглаживающий фильтр, высокочастотный (ВЧ) преобразователь, балласт и зажигающее устройство. Целью работы является разработка электронной полупроводниковой схемы включения и питания разрядной лампы повышенной энергетической эффективности с импульсным ЭПРА.

Методы. Использованы классические методы математического исследования с применением структурной схемой ЭПРА, его математическим описанием и адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути с длиной волны 254 нм.

Результаты. Для разных моментов времени представлены уравнения определения параметров импульсов, образованных огибающей в форме входного напряжения и тока промышленной частоты. Дано математическое описание для определения длительности импульсов и тока лампы в зависимости от значений номинального и рабочего напряжения и номинального тока. Представлены диаграмма мгновенных значений напряжения на входе ВЧ ключа и диаграмма формируемого импульсного тока. В работе проведен расчет параметров комплекта «УФ лампа – импульсный ЭПРА» при условии постоянства мощности лампы и использовании адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути длиной волны 254 нм.

Выводы. В результате расчетов были определены относительные значения лучистой отдачи резонансной линии ртути исследуемых УФ ламп. Теоретические исследования ЭПРА позволили разработать электронную полупроводниковую схему включения и питания разрядной лампы прямоугольными импульсами высокой частоты. В ходе работы для предложенного схемного решения импульсного ЭПРА проведен расчет параметров элементной базы с выбранными основными исходными характеристиками блокинг-генератора.

Ключевые слова: электронный пускорегулирующий аппарат, мощность, математическое описание, фильтр, преобразователь, импульс, резонансная линия ртути, блокинг-генератор

• Поступила: 20.10.2021 • Доработана: 24.02.2022 • Принята к опубликованию: 18.04.2022

Для цитирования: Коваленко О.Ю., Микаева С.А., Журавлёва Ю.А. Исследование и разработка импульсных электронных пускорегулирующих аппаратов в комплекте с ультрафиолетовыми лампами. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):103–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Research and development of pulse electronic control devices with UV lamps

Olga Yu. Kovalenko ¹, Svetlana A. Mikaeva ^{2, @}, Yulia A. Zhuravleva ²

¹ Ogarev Mordovia State University, Saransk, 430005 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: mikaeva_s@mirea.ru

Abstract

Objectives. When used in lighting installations with tubular low-pressure ultraviolet (UV) lamps, electronic ballasts should meet the following basic requirements: low cost, reliable ignition at low temperatures, as well as combining high energy efficiency with reliable lamp operation. As compared with electromagnetic ballasts, electronic ballasts allow the luminous efficiency and power factor of discharge lamps to be increased, reducing the consumption of scarce materials along with the weight of devices. In order to improve their energy efficiency, complete UV lamps are based on low-pressure discharge lamps with pulsed electronic ballasts supplying power at the frequency of 22–50 kHz. Various circuit designs include such basic units as mains filter, rectifier, power factor corrector, smoothing filter, high-frequency converter, ballast, and ignition device. The present study aimed to develop an electronic semiconductor circuit for switching on and powering a discharge lamp of increased energy efficiency using a pulsed electronic ballast.

Methods. Classical methods of mathematical research were applied for determining the flux of the 254-nm mercury resonance line using a structural electronic ballast diagram along with a mathematical description and adaptive model.

Results. Equations for determining the parameters of pulses formed by an envelope having the form of input voltage and current supplied at industrial frequency were formulated for different instants of time. A mathematical description is given for determining pulse duration and lamp current depending on the values of nominal and operating voltage, as well as nominal current. Diagrams for instantaneous voltage values at the high-frequency switch input and generated pulsed current are presented. The parameters of the ‘UV lamp–electronic ballast’ set were calculated using an adaptive model for determining the flux of the 254-nm mercury resonance line according to the condition of lamp power constancy.

Conclusions. Relative values for radiant efficiency of the 254-nm mercury line for UV lamps under study were determined. Theoretical research of electronic ballasts led to the development of a semiconductor switching and power supply circuit for the discharge lamp based on high-frequency rectangular pulses. The parameters of the element base were calculated along with selected basic initial characteristics of the blocking generator.

Keywords: electronic ballast, power, mathematical description, filter, converter, pulse, mercury resonance line, blocking generator

• Submitted: 20.10.2021 • Revised: 24.02.2022 • Accepted: 18.04.2022

For citation: Kovalenko O.Yu., Mikaeva S.A., Zhuravleva Yu.A. Research and development of pulse electronic control devices with UV lamps. *Russ. Technol. J.* 2022; 10(3):103–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-103-110>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития электротехнологий требует применения эффективных УФ разрядных ламп низкого давления в комплекте с электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА) [1, 2]. Исследование УФ излучения, а также эффективность применения УФ ламп низкого давления отражены в работах^{1, 2, 3} [3–5]. В облучательных приборах, работающих в светотехнических установках с трубчатыми УФ лампами низкого давления, ЭПРА должны удовлетворять основным требованиям: иметь невысокую стоимость; обеспечивать надежное зажигание разрядных ламп низкого давления в условиях пониженных температур; обеспечивать надежную работу ламп при повышенной энергетической эффективности.

По сравнению с электромагнитными пускорегулирующими аппаратами, ЭПРА обеспечивают повышение светоотдачи разрядных ламп и коэффициента мощности, снижение расхода дефицитных материалов, уменьшение массы в 2–4 раза. Выпускаемые в настоящее время ВЧ ЭПРА обладают дополнительными функциями, такими как предварительный подогрев электродов ламп, возможность регулировки потока излучения и др.

¹ Heathcote J. State of UV LED curing applications. *UV+EB Technology*. 2019;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2019/state-of-uv-led-curing-applications/>, дата обращения 01.10.2021. [Heathcote J. State of UV LED curing applications. *UV+EB Technology*. 2019;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2019/state-of-uv-led-curing-applications/>. Accessed October 1, 2021.]

² Lawal O., et al. Proposed method for measurement of output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps. *IUVA News*. 2008;10(1):14–17. URL: https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/100103LawalEtAl_Article.pdf, дата обращения 01.10.2021. [Lawal O., et al. Proposed method for measurement of output of monochromatic (254 nm) low pressure UV lamps. *IUVA News*. 2008;10(1):14–17. URL: https://uvsolutionsmag.com/stories/pdf/archives/100103LawalEtAl_Article.pdf. Accessed October 1, 2021.]

³ Lee P. Advancements in UV LED curing technology and solutions for print. *UV+EB Technology*. 2015;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2015/advancements-in-uv-led-curing-technology-and-solutions-for-print/>, дата обращения 01.10.2021. [Lee P. Advancements in UV LED curing technology and solutions for print. *UV+EB Technology*. 2015;1. URL: <https://uvebtech.com/articles/2015/advancements-in-uv-led-curing-technology-and-solutions-for-print/>. Accessed October 1, 2021.]

В ходе работы было предложено схемное решение ЭПРА с питанием лампы прямоугольными импульсами высокой частоты. Из литературных источников установлено, что ВЧ импульсные режимы питания более эффективны, чем синусоидальные [6, 7].

Для повышения энергетической эффективности УФ ламп, относящихся к разрядным лампам низкого давления, целесообразно использовать в комплекте с ними импульсные ЭПРА, обеспечивающие питание на частоте 22–50 кГц. Различные схемные решения ЭПРА включают в себя такие основные узлы как сетевой фильтр, выпрямитель, корректор коэффициента мощности, сглаживающий фильтр, ВЧ преобразователь, балласт и зажигающее устройство [8–12].

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭПРА

Для практической реализации импульсного ЭПРА была рассмотрена структурная схема, представленная на рис. 1.

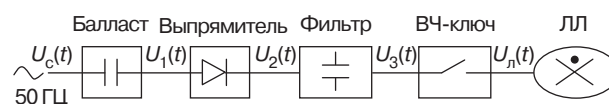


Рис. 1. Структурная схема импульсного ЭПРА. $U_c(t)$ – напряжение сети (напряжение на входе импульсного ЭПРА), $U_n(t)$ – рабочее напряжение на лампе, ЛЛ – люминесцентная лампа

Из схемы и рис. 2 видно, что амплитуда ВЧ импульсов ограничивается кривой сетевого напряжения $U_1(t)$, преобразованной выпрямителем. На входе ВЧ ключа имеется сглаживающий фильтр. В точке диаграммы (рис. 2), где синусоидальное напряжение $U_2(t)$ становится ниже напряжения на конденсаторе фильтра, напряжение начинает падать по экспоненте $U_3(t)$. Здесь штриховой линией обозначено напряжение на входе сглаживающего фильтра, сплошной линией – напряжение на его выходе.

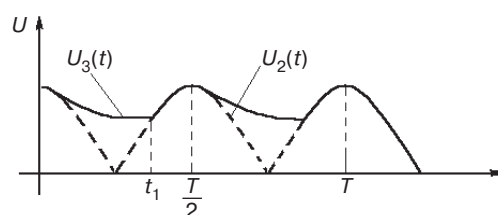


Рис. 2. Диаграмма мгновенных значений напряжения на входе ВЧ ключа

Для разных моментов времени можно записать два уравнения, описывающих параметры импульсов, образованных огибающей в форме входного напряжения $U_c(t)$ и тока промышленной частоты. Выходное напряжение ВЧ ключа имеет амплитуду, соответствующую амплитуде напряжения $U_3(t)$, длительность импульсов $t_{\text{и}}(t)$ (или паузы $t_{\text{п}}(t)$) зависит от их амплитуды. Определить величину $t_{\text{и}}(t)$ можно через значение рабочего напряжения на лампе $U_{\text{л}}(t)$ и эмпирические постоянные коэффициенты a , b .

Зависимость тока лампы от напряжения определяется по ее вольт-амперной характеристике при известных значениях номинального напряжения $U_{\text{ном}}(t)$ и тока $I_{\text{ном}}(t)$, а также рабочего напряжения на лампе $U_{\text{л}}(t)$.

Математическое описание может быть представлено системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{л}}(t) = U_{\text{м}} \exp\left(-\frac{1}{RC}t\right) & \text{при } 0 < t < t_1, \\ U_{\text{л}}(t) = U_{\text{м}} \cos 314t & \text{при } t_1 < t < \frac{T}{2}, \\ t_{\text{и}}(t) = \frac{a}{U_{\text{л}}(t) + b}, \\ i(t) = I_{\text{ном}} \exp\left(\frac{\ln U_{\text{л}}(t) - \ln U_{\text{ном}}(t)}{\rho}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{\text{м}}$ – амплитудное значение сетевого напряжения, В; C – емкость сглаживающего фильтра, Ф; R – активная составляющая сопротивления лампы, Ом; $i(t)$ – ток на входе ВЧ ключа, А; значение угловой частоты ω при частоте сигнала $f = 50$ Гц равно $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$; ρ – постоянный коэффициент, равный 0.2–0.26; a , b – постоянные коэффициенты, равные соответственно 0.0025 с · В и 30 В.

Для исследуемых УФ ламп по уравнениям (1) и при использовании адаптивной модели для определения потока резонансной линии ртути с длиной волны 254 нм, представленной в работе⁴, проводился расчет параметров комплекта «УФ лампа – ЭПРА» при условии постоянства мощности лампы.

Основные результаты расчета отражены в таблице.

В результате расчетов были определены относительные значения лучистой отдачи ртутной линии 254 нм исследуемых УФ ламп типа ЛЭ 30 и ЛЭР 40 в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном и стационарном

Таблица. Относительные значения лучистой отдачи линии 254 нм УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном ($H_{\text{имп}}$) и стационарном ($H_{\text{стац}}$) режимах). $P_{\text{ср}}$ – усредненное значение мощности лампы в комплекте с импульсным ЭПРА

$P_{\text{ср}}$, Вт	f , кГц	$t_{\text{п}}$, мкс	Скважность	C , мкФ	$H_{\text{имп}}/H_{\text{стац}}$
30.1	23.1	25	2.35	30	0.687
30.0	23.7	25	2.42	50	0.822
30.0	41.0	6	1.32	50	0.927
29.9	43.8	10	1.77	50	0.975
40.0	23.6	25	2.41	50	0.746
39.9	43.6	10	1.77	50	0.880

режимах). За стационарный режим принимался режим работы лампы с постоянным напряжением питания. Стационарный режим для разрядных ламп, несмотря на эффективность, не может быть использован из-за явления катафореза, приводящего к снижению потока излучения лампы в течение непродолжительного промежутка времени.

Из таблицы видно, что наиболее эффективными для исследуемых УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА можно считать режимы на частоте 41–44 кГц при скважности 1.77.

РАЗРАБОТКА СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭПРА

Теоретические исследования ЭПРА позволили разработать электронную полупроводниковую схему включения и питания разрядной лампы с выбранными исходными элементами, которая при нестабильном входном напряжении обеспечивает высокую стабильность лучистого потока в результате применения обратной связи, определяющей зависимость скважности импульсов тока $t_{\text{и}}(t)$ от величины входного напряжения (рис. 3).

Предложенная схема включения и питания разрядной лампы, представленная на рис. 3, является автогенераторной (самовозбуждающейся). Рабочие частоты ВЧ ключа находятся выше 25 кГц. В качестве силового полупроводникового элемента можно применять среднечастотный транзистор. При подаче напряжения на вход на коллекторе транзистора VT появляется скачок напряжения, передаваемый через конденсатор $C5$ на первичную обмотку трансформатора Tr с сердечником из феррита, имеющим петлю гистерезиса прямоугольной формы.

При расчетах параметров элементов выбранного варианта импульсного ЭПРА выбирались значения мощности лампы и режимы ВЧ питания.

Расчетные формулы и результаты расчета основных параметров для схемы (рис. 3) представлены

⁴ Коваленко О.Ю. *Светотехнические установки для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных*: дис. докт. техн. наук. Саранск: МГУ им. Н.П. Огарёва; 2009. [Kovalenko O.Yu. *Lighting installations for increasing the productivity of farm animals*. Dr. Sci. Thesis (Eng.). Saransk: Ogarev MSU; 2009 (in Russ.).]

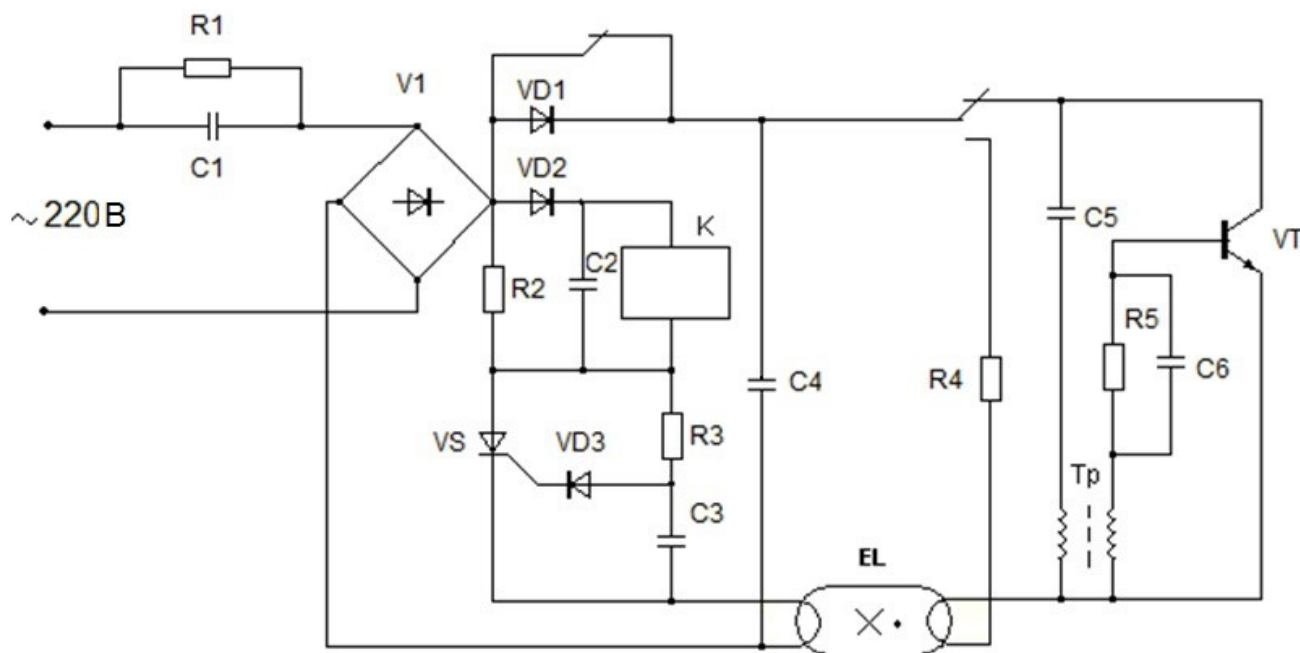


Рис. 3. Схема включения и питания УФ разрядной лампы с номинальным напряжением 220 В

с учетом параметров импульсов: амплитудных значений тока и напряжения, их длительности и частоты.

Для примера можно принять следующие основные исходные параметры для расчета блокинг-генератора (ВЧ ключа):

$E_K = 150$ В, $t_{и} = 6-10$ мкс, $f = 40-50$ кГц, $R_H = 239$ Ом, $I_{ср} = 0.43$ А, $T^0 = 20-25$ °С, $R_d = 20$ Ом, $R_6 = 100$ Ом,

где E_K – электродвижущая сила в выходной цепи транзистора; R_H – сопротивление источника сигнала или выходное сопротивление предыдущего каскада; $I_{ср}$ – среднее значение импульсного тока лампы; T^0 – температура корпуса транзистора в рабочем режиме; R_d – сопротивление демпфирующей цепи; R_6 – объемное сопротивление базы.

С учетом таких параметров транзистора, как мощность, рассеиваемая на коллекторе, коллекторное напряжение и длительность импульса, был выбран транзистор КТ809А.

Значение индуктивности L первичной обмотки вычисляется из соотношения:

$$L = \frac{(E_K - U_{КО})t_{и}}{I_{КДОП} - (I_{КН} - 0.8E_K/r_{вх})}, \quad (2)$$

где $U_{КО}$ – остаточное коллекторное напряжение насыщенного транзистора ($U_{КО} = 3$ В); $I_{КДОП}$ – допустимый коллекторный ток транзистора ($I_{КДОП} = 5$ А); $I_{КН}$ – начальный ток в коллекторной цепи; $r_{вх}$ – входное сопротивление транзистора по схеме с общим эмиттером ($r_{вх} = 34$ Ом).

Максимальное значение коллекторного напряжения определим по формуле:

$$U_{Km} = E_K \left(1 + \frac{t_{и}}{L} R_3 \right), \quad (3)$$

где R_3 – эквивалентное сопротивление коллекторной цепи:

$$R_3 = \frac{R_H (R_d + r_d)}{R_H + R_d + r_d}, \quad (4)$$

R_d принимаем равным 20 Ом; r_d – прямое сопротивление диода ($r_d = 5$ Ом).

При увеличении температуры ($T^0 > T_1^0$) можно определить величину теплового тока, создаваемого остаточным коллекторным напряжением насыщенного транзистора:

$$I_{КО} = I_{КО}(T_1^0) e^{0.08(T^0 - T_1^0)}, \quad (5)$$

где T_1^0 – температура окружающей среды. Ток $I_{КО}$ (тепловой ток перехода) примерно удваивается при увеличении температуры на 10 °С. Определяем значение электрической емкости $C5$ при сопротивлении $R_6 = 100$ Ом, полагая потенциал базы (источник постоянного напряжения) $E_6 = E_K$,

$$C5 = \frac{\tau_H}{\left(1 - \theta \frac{\tau_H}{\tau_{и}} \right) (r_6 + R_6)}, \quad (6)$$

где τ_H – постоянная времени накопления (для транзистора КТ809А $\tau_H = 28.9$ мкс); $\tau_{и}$ – длительность импульса, мкс; r_6 – входное сопротивление базы транзистора; θ – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\theta = \frac{t_i (\tau_{\text{BX}} - \tau_{\text{H}})}{\tau_{\text{BX}} \tau_{\text{H}}}, \quad (7)$$

где τ_{BX} – постоянная времени заряда емкости, характеризующаяся временем переднего фронта импульса. Примем τ_{BX} равной 40 мкс.

В соответствии с расчетом выберем конденсатор С6, необходимый для компенсации индуктивного сопротивления вторичной обмотки трансформатора и сопротивления R_1 , R_d . Сопротивление нагрузки примем равным $R_{\text{H}} = 349$ Ом. Диоды выберем с учетом величины тока через нагрузку, равного среднему значению импульсного тока лампы $I_{\text{cp}} = 0.43$ А.

Коэффициент пульсации K выпрямительного напряжения принимаем равным 0.3.

Емкость сглаживающего фильтра определяется по формуле:

$$C4 = \frac{1}{\omega R_{\text{H}}} \sqrt{\frac{1.68}{\text{arth}^2 K} - 4}. \quad (8)$$

Емкость цепи переменного тока при значении постоянного эмпирического коэффициента m , зависящего от типа выпрямителя (для двухполупериодного выпрямителя $m = 0.34$) определялась по формуле:

$$C1 = \frac{(0.455K + 1.15)}{\omega R_{\text{H}} \sqrt{\frac{1}{m^2} - (1 + K)^2 \frac{K}{0.57} \left(2 - \frac{K}{0.57}\right) - (1 + K) \left(1 - \frac{K}{0.57}\right)}}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате расчетов определена элементная база с установленными значениями основных параметров для блокинг-генератора:

- конденсаторы С1 – 5 мкФ × 250 В (КБГ-МП); С4 – 50.0 мкФ × 350 В (К-50-7), С5 – 470 мкФ; С6 – 5 мкФ;
- резисторы R1 = 10 Ом; R2 = 20 Ом; R3 = 200 Ом; R4 = 2 Ом; R5 = 5.1 Ом;
- диоды VD1–VD4 – Д 229 Л; VD5 – Д 226 Б;
- транзистор VT – КТ 809 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования проведены расчеты относительных значений лучистой отдачи ртутной линии 254 нм УФ ламп в комплекте с импульсным ЭПРА (отношение лучистых отдач при импульсном и стационарном режимах). В процессе работы для них были определены наиболее эффективные режимы, предложено схемное решение импульсного ЭПРА, которое при использовании обратной связи, контролирующей длительности импульсов тока и напряжения, обеспечивает управление работой ВЧ ключа и дает высокую стабильность лучистого потока.

Вклад авторов

О.Ю. Коваленко – общее руководство, планирование и проведение исследований.

С.А. Микаева – проведение исследований, сбор и обработка данных, обзор литературы.

Ю.А. Журавлёва – проведение исследований, анализ результатов, написание статьи.

Authors' contributions

O.Yu. Kovalenko – overall supervision, planning and conducting research.

S.A. Mikaeva – conducting research, data collection and processing, and literature review.

Yu.A. Zhuravleva – conducting research, analysis of results, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко О.Ю., Сарычев П.А., Микаева С.А., Микаева А.С. Совершенствование ультрафиолетовых разрядных ламп низкого давления. *Автоматизация и современные технологии*. 2011;12:13–15.
2. Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А., Гусева Е.Д. Повышение эффективности и контроль параметров источников излучения облучательных установок в сельском хозяйстве. *Фотоника*. 2017;8(68):68–73. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.68.73>
3. Николаева Е.В., Алексеев Ю.В., Ларюшин А.И., Соснин Э.А. Применение ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 305–315 нм в терапии ряда дерматологических заболеваний. *Лазерная медицина*. 2014;18(4):51. URL: https://www.goslasmed.ru/wp-content/uploads/2016/09/Lazer-med_4_2014.pdf
4. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Berlin: Springer; 2009. 501 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>

REFERENCES

1. Kovalenko O.Yu., Sarychev P.A., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. Improvement of the ultra-violet low pressure digit lamps. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii = Automation and Modern Technologies*. 2011;12:13–15 (in Russ.).
2. Kovalenko O.Yu., Pil'shchikova Yu.A., Guseva E.D. Efficiency improvement and parameter checkout of emission sources of irradiation equipment in agriculture. *Fotonika = Photonics Russia*. 2017;8(68):68–73 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.68.8.68.73>
3. Nikolaeva E.V., Alekseev Yu.V., Laryushin A.I., Sosnin E.A. Ultraviolet irradiation in the wavelength range 305–315 μm for treating a number of dermatological diseases. *Lazernaya meditsina = Laser Medicine*. 2014;18(4):51 (in Russ.). Available from URL: https://www.goslasmed.ru/wp-content/uploads/2016/09/Lazer-med_4_2014.pdf

5. Sankar G.U. A survey on wavelength based application of ultraviolet LED. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.* 2016;2(6):23–24. URL: <https://ijsrset.com/paper/1986.pdf>
6. Охонская Е.В. Эффективность люминесцентных ламп при высокочастотном питании. *Светотехника.* 1987;2:10–12.
7. Цветков Е.И. О результатах исследования комплекта люминесцентная лампа – импульсный полупроводниковый ПРА. *Человек и свет: Межвуз. сб. науч. трудов.* Саранск: Изд-во Мордовского гос. ун-та; 1982. С. 86.
8. Микаева С.А., Микаева А.С. *Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем.* М.: РУСАЙНС; 2017. 136 с. ISBN 978-5-4365-1785-8
9. Поляков В.Д., Смирнов Е.М. Характеристики люминесцентных ламп при управлении подогревом электрода с помощью ЭПРА. *Светотехника.* 2008;4:46–49.
10. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Оборудование для испытаний управляющих устройств для светильников со светодиодами и ЭПРА для люминесцентных ламп. *Светотехника.* 2017;4:42–46.
11. Малышев А. Новое – хорошо забытое старое: особенности питания бактерицидных и люминесцентных ламп и выбор ЭПРА для них. *Полупроводниковая светотехника.* 2021;6(74):26–30.
12. Терентьев Б. Электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА): история, принцип работы, проблемы. Популярны микросхемы для ЭПРА. *Компоненты и технологии.* 2008;5(82):106–110. URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_5_106.pdf
4. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook.* Berlin: Springer; 2009. 501 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
5. Sankar G.U. A survey on wavelength based application of ultraviolet LED. *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.* 2016;2(6):23–24. Available from URL: <https://ijsrset.com/paper/1986.pdf>
6. Okhonskaya E.V. The efficiency of fluorescent lamps with high-frequency power supply. *Svetotekhnika = Light & Engineering.* 1987;2:10–12 (in Russ.).
7. Tsvetkov E.I. On the results of the study of a set of fluorescent lamp-pulsed semiconductor ballast. In: *Chelovek i svet: Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov (Man and light: Interuniversity collection of scientific papers).* Saransk: Mordovia State University Publishing House; 1982. P. 86 (in Russ.).
8. Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. *Eksperimental'nye issledovaniya kharakteristik perspektivnykh istochnikov sveta, priborov i system (Experimental study of characteristics of advanced light sources, devices and systems).* Moscow: RUSAINS; 2017. 136 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4365-1785-8
9. Polyakov V.D., Smirnov E.M. Investigation the characteristics of luminescent lamps' cathode heating control by means of electron start-control devices (ESCD). *Light & Engineering.* 2008;16(4):43–47.
10. Bepalov N.N., Il'in M.V., Kapitonov S.S. Testing equipment for LED luminaire control devices and fluorescent lamp electron ballasts. *Light & Engineering.* 2017;25(4):86–91.
11. Malyshev A. New – well-forgotten old: nutritional features of bactericidal and fluorescent lamps and the choice of electronic ballasts for them. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika = Solid – State Lighting.* 2021;6(74):26–30.
12. Terent'ev B. Electronic ballasts (EPRA): history, principle of operation, problems. Popular microcircuits for electronic ballasts. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies.* 2008;5(82):106–110 (in Russ.). Available from URL: https://kit-e.ru/wp-content/uploads/2008_5_106.pdf

Об авторах

Коваленко Ольга Юрьевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры метрологии, стандартизации и сертификации Института электроники и светотехники ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (430005, Россия, Саранск, Большевикская ул., д. 68). E-mail: crystal2000@mail.ru. Scopus Author ID 57190227678.

Микаева Светлана Анатольевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. Scopus Author ID 57214070393, <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Журавлёва Юлия Алексеевна, к.т.н., доцент, доцент кафедры электроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ulypil@mail.ru. Scopus Author ID 57217961848, <https://orcid.org/0000-0003-3919-5127>

About the authors

Olga Yu. Kovalenko, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Metrology, Standardization and Certification, Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Ogarev Mordovia State University (68, Bolshhevistskaya ul., Saransk, 430005 Russia). E-mail: crystall2000@mail.ru. Scopus Author ID 57190227678.

Svetlana A. Mikaeva, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of Electronics Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mikaeva_s@mirea.ru. Scopus Author ID 57214070393, <https://orcid.org/0000-0001-6992-455X>

Yulia A. Zhuravleva, Cand. Sci., (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor, Department of Electronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ulypil@mail.ru. Scopus Author ID 57217961848, <https://orcid.org/0000-0003-3919-5127>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 7.05

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-111-120>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Концепция юзабилити с позиции универсального дизайна

И.Ю. Мамедова,
А.Э. Дрюкова[@],
Н.Е. Мильчакова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: dryukova@mirea.ru

Резюме

Цели. В статье представлено понятие юзабилити как основополагающей концепции многих направлений современного дизайна: промышленного, графического, цифрового и т.д. с учетом развития технологий. Целью статьи является формулирование концепции юзабилити в цифровом дизайне на основании эволюции юзабилити в промышленном дизайне.

Методы. Использование исторического метода исследования показало, что юзабилити применительно к взаимосвязи между человеком и объектом дизайна характеризуется унификацией формы. С помощью метода аналогии этот вывод был применен и по отношению к цифровому дизайну. В статье приведены основные принципы оценки юзабилити в дизайне, а также характер ее влияния на дальнейшее развитие дизайна. Требования к проектируемому продукту с точки зрения анализа юзабилити рекомендовано выполнять с учетом принципов универсальности, являющихся основой системы универсального дизайна.

Результаты. Принимая во внимание принципы проектирования в промышленном дизайне и современные требования в области графического, цифрового и веб-дизайна, авторами предложено формировать юзабилити цифрового продукта с точки зрения универсальности и искать наиболее рациональные визуальные образы при проектировании объектов UI/UX дизайна. В статье приведены примеры разработок промышленного и цифрового дизайна, выполненных студентами с применением концепции универсального дизайна.

Выводы. Использование принципов универсальности как в промышленном, так и в UI/UX дизайне, позволяющее сформировать юзабилити проектируемого объекта дизайна.

Ключевые слова: юзабилити, формообразование, промышленный дизайн, цифровой дизайн, универсальный дизайн

• Поступила: 11.03.2022 • Доработана: 29.03.2022 • Принята к опубликованию: 25.04.2022

Для цитирования: Мамедова И.Ю., Дрюкова А.Э., Мильчакова Н.Е. Концепция юзабилити с позиции универсального дизайна. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-111-120>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The concept of usability in terms of universal design

Irina Yu. Mamedova,
Anna E. Dryukova[@],
Natalia E. Milchakova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: dryukova@mirea.ru

Abstract

Objectives. The paper discusses usability as the concept underlying many contemporary design trends and accompanying technological development in various industrial, graphic and digital contexts. A formulation of the concept of usability in digital design contexts is advanced based on the evolution of industrial design.

Methods. Using the historical research method, usability is shown to be characterized by unification of form as applied to the relationship between a person and a design object. This conclusion has been applied to digital design using the analogy method. Basic principles of usability assessment in design are outlined, along with impacts on further development. Requirements for a designed product in terms of usability analysis should be fulfilled taking into account the principles of universality that constitute a basis for a universal design system.

Results. When developing UI/UX design objects, the usability of a digital product is considered in terms of universality based on rational visual image principles of industrial design and taking contemporary requirements in graphic, digital, and website design into account. Examples of industrial and digital design developments carried out by students using the concept of universal design are presented.

Conclusions. The usability of a design object can be shaped by using universal principles applying in both industrial and UI/UX design.

Keywords: usability, shaping, industrial design, digital design, universal design

• Submitted: 11.03.2022 • Revised: 29.03.2022 • Accepted: 25.04.2022

For citation: Mamedova I.Yu., Dryukova A.E., Milchakova N.E. The concept of usability in terms of universal design. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):111–120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-111-120>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Задача современного дизайнера представляет собой сложную многоплановую систему тесно переплетенных требований, условий и рамок, зачастую противоречивых и неоднозначных. Одной из важных составляющих работы дизайнера сегодня является формирование продукта, обладающего таким свойством, как юзабилити (usability) – «пригодность к использованию». Юзабилити – это свойство дизайн-продукта, при наличии которого потребитель имеет возможность применить конечный продукт в указанных условиях использования для достижения установленных целей с необходимой результативностью, эффективностью и удовлетворенностью.

Это ключевая по важности характеристика, т.к. именно она позволяет оценить качество дизайна продукта. В области промышленного дизайна юзабилити определяется формой проектируемого объекта.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Современный человек ежедневно выполняет множество привычных действий, значительная часть которых доведена до автоматизма. Обычно мы не задумываемся над природой бытовых мелочей, окружающих нас. Зубная щетка, кофейная чашка, ботинки, расческа – у каждого из этих предметов своя история, не всегда простая и не всегда мирная (взять, к примеру, обычную столовую вилку).

Форма каждого из повседневных объектов, которая воспринимается нами как некая данность, формировалась с течением времени по всем законам эволюции. В общем принципе формообразования объектов предметного мира, несмотря на их многоплановость и несхожесть между собой, можно проследить определенную закономерность.

Многие процессы, определяющие нашу жизнь, имеют цикличную природу. Принцип формообразования в дизайне подчиняется тем же законам, что и другие процессы, происходящие в социуме. Анализируя характер эволюции формы тех или иных объектов, можно проследить взаимосвязь между историческими эпохами: готика, Ренессанс, барокко, классицизм... И тут можно с определенной долей уверенности сказать, что не смена художественных стилей в истории влияла на форму предметов быта, а как раз наоборот: экономическая ситуация и особенности научно-технического прогресса в данную эпоху определяли характер производства, что приводило к изменению форм и, как следствие, к появлению новых стилей в искусстве.

На протяжении многих веков оттачивались навыки ремесленного производства, не потерявшие актуальности и по сей день. Значительное внимание уделялось совершенствованию форм наиболее востребованных предметов обихода и быта. Достаточно длительное время не предпринималось попыток осмысления, научного обоснования и описания законов и принципов формообразования объектов. Ремесленное производство не предполагает проектирования. Формообразование изделий на протяжении веков носило стихийный характер. За каждым шедевром ручного труда стоит опыт предшествующих мастеров поколений, множество проб и ошибок, неожиданных находок и неизбежных провалов. Случайно найденная удачная форма, сочетающая в себе удобство, функциональность и эстетичность, «приживалась» в быту, а неудачные аналоги постепенно исчезали. Происходила эволюция, приводившая на определенном этапе к унификации формы бытовых объектов.

Человек первобытного общества знал не так много материалов, и появление каждого нового было значимым событием, поэтому эпохи того времени носят характерные названия: «каменный век», «железный век», «бронзовый век». Когда кусок глины случайно попал в костер, к освоенным ранее древесине и камню присоединилась керамика. Когда из куска руды в огне вытекла блестящая капля, человек познакомился с металлом. Появление новых материалов и технологий их обработки каждый раз давали новый вектор развития для художников, мастеров, архитекторов. Новые материалы и технологии рождали невиданные ранее объекты и формы,

и параллельно шло переосмысление старых форм. Но в конечном итоге все эти процессы вновь приводили к унификации формы в рамках нового стиля, причем, достаточно часто на новом витке прогресса происходило возвращение к прежним наработкам (рис. 1). Тем не менее, форма всегда была неотрывно и прочно связана с процессом производства.



Рис. 1. Эволюция формы кружки от древности (а) до наших дней (б)

В эпоху Возрождения произошло много событий, изменивших мир. Одним из них было зарождение проектирования как отдельного, самостоятельного вида деятельности. И если сейчас вполне очевидна разница между идеей и ее реализацией, то тогда этот подход был несомненным новшеством – форма начинала свое существование отдельно от воплощения в материале, ремесленное мастерство начало утрачивать свою роль в производстве. Ученые, художники, архитекторы – предтечи современных инженеров – опираясь на достижения средневековой науки, изобретали различные механизмы, проводили эксперименты и вычисления, вели записи. Тем не менее, форма еще не была осмыслена как некое самостоятельное явление, и на формообразование привычных предметов быта эти изменения в сознании не влияли.

Первые попытки систематизировать принципы формообразования были предприняты в тот период, который принято называть «промышленной революцией». Надо отметить, что это явление в истории человечества также циклично и подвержено тем же законам, что и все предыдущие изменения в образе мышления.

Первая промышленная революция началась с изобретения парового двигателя и пришлась на конец XVIII – начало XIX вв. Этот период описан в учебниках истории, социологии, экономики и дизайна как один из ключевых моментов в формировании современного общества, с которым связано начало полного переустройства мира в целом. Ремесленное производство изделий медленно, но неуклонно вытеснялось промышленным. Привычные формы, характерные для ремесленного производства, в новых

условиях переставали работать, теряли изящество линий, функциональность и удобство. В попытках скрыть очевидные промахи в форме новых изделий производители прибегали к так называемому «украшательству» – изделия расписывали орнаментами, маскировали неуклюжесть внешних объемов и соединений чеканными накладками и кофрами. Именно в это время необходимость проектирования формы не в процессе производства, а на отдельном, предначальном его этапе, стала остро необходима. Требовалось научное осмысление принципов формообразования, выявление его закономерностей, основанных на системном подходе. На помощь промышленникам пришли художники-архитекторы, для которых проектирование было вполне привычным явлением. Именно архитекторы стали первыми законодателями в области промышленного дизайна. Становление дизайна связано с такими именами как Годфрид Земпер (немецкий архитектор, 1803–1879 гг.) и Генри Коул (английский художник и общественный деятель, 1808–1882 гг.). Кристаллизация нового вида деятельности, названного позднее *дизайном*, заняла фактически весь XIX век.

В конце XIX – начале XX вв. промышленное производство перешло на новый уровень. Создаваемые объекты быта стали недорогими, удобными и доступными широким массам. Замена паровых и водяных двигателей на электрические, изобретение конвейера, развитие транспорта, телеграфа, появление телефона и радио привели ко второй промышленной революции.

В это время был сформулирован первый и, пожалуй, самый знаменитый на сегодняшний день принцип формообразования в дизайне – «форма следует за функцией». Этот постулат, высказанный архитектором Луи Салливаном в 1896 г., определил направление формообразования в XX в. (надо заметить, что до сих пор многие дизайнеры руководствуются им как непреложной заповедью). В рамках промышленного производства этот подход к формообразованию был настолько гениально прост и очевиден, что в начале XX века сформировались школы промышленного дизайна, основанные на принципе функционализма Салливана (Баухаус, ВХУТЕМАС). Поиск формы, максимально обеспечивающей функцию объекта, стал главной стратегией второй промышленной революции. Изделия того периода предельно лаконичны, изящны в своей функциональной простоте и стилистике. Юзабилити дизайн-проекта определялось качеством взаимосвязи между формой и функцией.

Окончание Второй мировой войны связывают с третьим витком промышленной революции. Это время было ознаменовано резким увеличением темпов научно-технического прогресса. Электрические приборы различного назначения из

узкоспециализированных областей промышленного производства активно стали переселяться в повседневную жизнь обычных людей, персональные автомобили стали общедоступными, активно развивалась электроника, в производство начали широко внедряться новые материалы на основе полимеров. Разнообразие форм выпускаемых изделий в 1960–1980 гг. поражает воображение.

Роль дизайн-проектирования в производстве существенно выросла. В этот период намечается несколько течений в дизайне, связанных с принципиальным отказом от функционализма как фундамента юзабилити и основанных на противостоянии установленным правилам формообразования. Многочисленные примеры арт-дизайна, постмодернизма, бионических тенденций, которые исходят из принципов «форма следует за стилем», «форма не следует за функцией», «функция и есть форма», рождали множество форм и изделий. Значительная их часть с течением времени потеряла актуальность, вышла из моды. Вновь наметилась тенденция на унификацию форм, которая была основана уже не на отработке и совершенствовании в течение столетий, а на качестве дизайн-концепции.

В настоящее время мы можем воочию наблюдать процесс унификации форм, рожденных второй и третьей промышленными революциями. В качестве примера можно привести автомобиль. На заре автомобилестроения, в период второй промышленной революции, форма автомобиля диктовалась его устройством и функцией, а разнообразие этих форм ограничивалось возможностями производства. В период третьей промышленной революции с развитием технологий обработки и соединения материалов, совершенствованием аэродинамических и эргономических испытаний, в автомобилестроении значительно увеличилось количество разнообразных форм. Производители в стремлении поразить покупателя и повысить продажи использовали все доступные средства: с конвейеров автоконцернов сходили автомобили множества размеров, форм, расцветок и вариантов исполнения. Анализ стилей в дизайне автомобилей второй половины XX в. является темой для отдельной научной работы. К началу XXI в. дизайн подавляющего большинства автомобилей мировой автопромышленности уже был унифицирован настолько, что отличались они друг от друга лишь отдельными деталями оформления – фарами, радиаторами, характером формообразующих линий багажника (рис. 2). Общая форма пришла к единому образу, продиктованному не столько функцией, сколько соотношением между аэродинамикой, экономическими характеристиками и эргономикой. Именно этот баланс характеристик в конечном итоге обеспечивает параметры юзабилити.



(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2. Эволюция формы автомобиля:

(а) Chevrolet Bel Air 1958 г.; (б) Shelby GT500 1969 г.; (в) Toyota Auris 2008 г.; (г) FORD Fiesta 2009

К концу XX века в дизайне наметился кризис. Закон Салливана, изрядно пострадавший в ходе исканий дизайнеров второй половины XX века, но тем не менее исправно работавший почти столетие, оказался бессилем в области производства объектов, функция которых лежит вне области предметного мира. Четвертая промышленная революция, в эпицентре которой мы находимся прямо сейчас, накладывает на дизайнеров еще большее бремя ответственности. Эта революция связана с формированием нового качества жизни, с цифровизацией, разработкой искусственного интеллекта, вытеснением традиционных технологий производства массовой кастомизацией. На унификацию формы естественным путем теперь нет ни времени, ни средств. Дизайнер должен здесь и сейчас формировать юзабилити объектов, ориентируясь на предпочтения, которым еще только предстоит сформироваться. Унификация автомобилей произошла в течение полувека. Унификация, к примеру, средств мобильной связи или компьютерных мышек – в течение 20 лет (рис. 3).



(а)



(б)

Рис. 3. Эволюция формы компьютерной мыши:

(а) образцы устройств 1990-х гг.;
(б) современные компьютерные мыши

В сложившейся ситуации формообразование с обязательным обеспечением юзабилити требует нового подхода, учитывающего не только функцию, но и тенденцию к будущей унификации, обусловленной востребованностью и качеством проработки. И наиболее полно развитие современного юзабилити в дизайне характеризует принцип «форма следует за эргономикой». Современные цифровые продукты уже зачастую не предполагают прямого манипулирования ими. Например, функция современных наушников, по большому счету, не отличается от функции наушников в прошлом, но принцип их работы, технологии

взаимодействия с человеком изменилась кардинально. Их форма теперь может варьироваться в очень широком диапазоне – от привычных до бионических [1–6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В области промышленного дизайна понятие юзабилити неотрывно связано с эволюцией формы и формообразованием изделий. При разработке и создании промышленных объектов также необходимо учитывать принципы универсальности. Развитие цифровых технологий привело к созданию цифровых продуктов, для которых эволюция дизайна, в отличие от промышленных продуктов, зависит в большей степени от юзабилити. Формообразование в цифровом дизайне заключается в поиске гармоничных цветовых сочетаний, определения стилистики элементов (в т.ч., определения формы этих элементов), создании гармоничной композиции. Однако наиболее важным критерием в области цифрового дизайна является юзабилити (удобство в использовании). Поэтому, прежде чем приступить к разработке дизайна веб-сайта или мобильного приложения, разработчики проводят тщательные предпроектные исследования. Юзабилити в разработке пользовательских интерфейсов связано с исследованиями в области UI/UX¹ дизайна – разработка проектов пользовательских интерфейсов с учетом удобства пользователя и гармоничного внешнего вида интерфейса.

Цифровизация в современном мире способствует преобразованию социально-технических структур, ранее обеспеченных нецифровыми продуктами и отношениями, в структуры, опосредованные цифровыми продуктами и отношениями с встроенными новыми цифровыми возможностями. Развитие цифровизации и цифровых технологий сформировало стремление к созданию нового, так называемого «бестелесного» продукта. Это создание и разработка цифровых продуктов. Для того чтобы создавать цифровые продукты, современный дизайнер должен освоить определенные цифровые компетенции и навыки.

Цифровые навыки подразумевают освоение набора возможностей цифровых устройств, приложений связи и сетей для доступа к информации и управления ею. Цифровые навыки и компетенции необходимо освоить в следующих областях: программирование и веб-разработка, разработка приложений, цифровой дизайн, управление проектами, цифровой маркетинг, аналитика данных.

Рассмотрим основные преимущества создания цифровых продуктов:

1. *Низкие накладные расходы.* Безусловно, работа в области цифрового дизайна предполагает

расходы на закупку компьютерной техники и лицензионного профессионального программного обеспечения. Однако создание каждой единицы цифрового продукта (цифровая айдентика, лендинг-страница и т.д.) не требует каждый раз закупки сырья для их создания, в отличие, например, от промышленного производства.

2. *Высокая рентабельность.* При разработке цифрового продукта отсутствуют периодические расходы на материалы, поэтому получение прибыли происходит без использования расходных материалов. Затраты идут на оплату труда, электроэнергии и т.д.
3. *Автоматизация процесса разработки.* При разработке различных цифровых продуктов многие процессы можно автоматизировать и ускорить процесс завершения работы.
4. *Гибкость транспортировки отправки цифровых продуктов.* Современные технологии позволяют хранить и передавать потребителю цифровые продукты с помощью облачных и других технологий, которые не предусматривают их физической транспортировки.

Важным аспектом в создании успешного и конкурентноспособного цифрового продукта являются его эргономические показатели, удобство использования, юзабилити. Продукт в области цифрового дизайна, например, разработка дизайна сайта или его мобильной версии проходит достаточно длительный процесс тестирования в области UI/UX дизайна. Этот процесс имеет общие корни с процессом эволюционного формообразования в промышленном дизайне. В процессе работы веб-дизайнеры стараются получить максимальный пользовательский отклик на каждый элемент работы цифрового продукта. Далее проводится анализ пользовательского опыта и устранение неполадок в работе веб-сайта или мобильного приложения.

Перед началом макетирования предстоит составить пользовательский маршрут, по которому человек будет «путешествовать» в рамках разработанного графического пользовательского интерфейса, что является каркасом для работы (рис. 4). После обсуждения маршрута происходит разработка архитектуры и макетирование (рис. 5). Важным итогом работы является визуализация интерфейса (рис. 6) [7–9].

В современном мире в промышленном дизайне, архитектуре учитываются принципы универсальности. Одним из направлений современного дизайна, позволяющем дизайнеру ориентироваться в быстро изменяющихся тенденциях, является система универсального дизайна. Это направление изначально предполагает разработку проектов с учетом требований эргономики. Оно основано на принципах инклюзивности и ориентировано на широкий круг людей. Универсальный дизайн

¹ User Interface (UI) – пользовательский интерфейс; User Experience (UX) – опыт пользователя.

формирует предметно-пространственную среду, доступную для людей с различными возможностями и физическими особенностями [10–14]. Продукты, спроектированные с учетом принципов универсальности, должны быть приспособлены к широкому спектру индивидуальных предпочтений и возможностей. Они просты в использовании и интуитивно понятны. Дизайн объекта передает информацию пользователю, минимизирует опасности и неблагоприятные

последствия от случайных или непреднамеренных действий. Универсальный дизайн обеспечивает эффективное использование объектов с комфортом и с минимальным утомлением. Ориентированность на эргономику задает размеры объектов и среды, обеспечивающие их использование вне зависимости от размеров тела, состояния и мобильности пользователя. Форма таких объектов не требует унификации, они изначально универсальны.

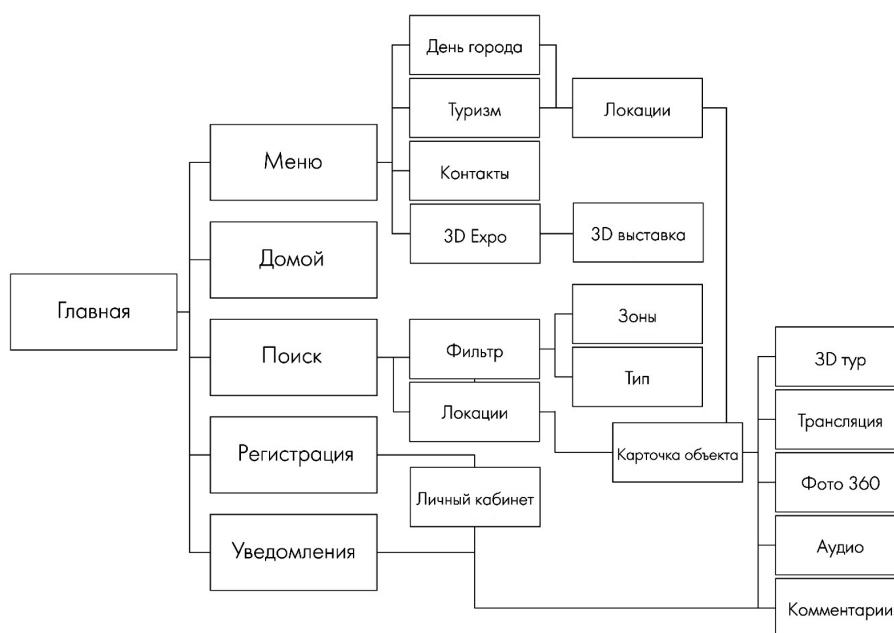


Рис. 4. Разработка пользовательского маршрута для сайта выставки



Рис. 5. Разработка дизайна макета сайта

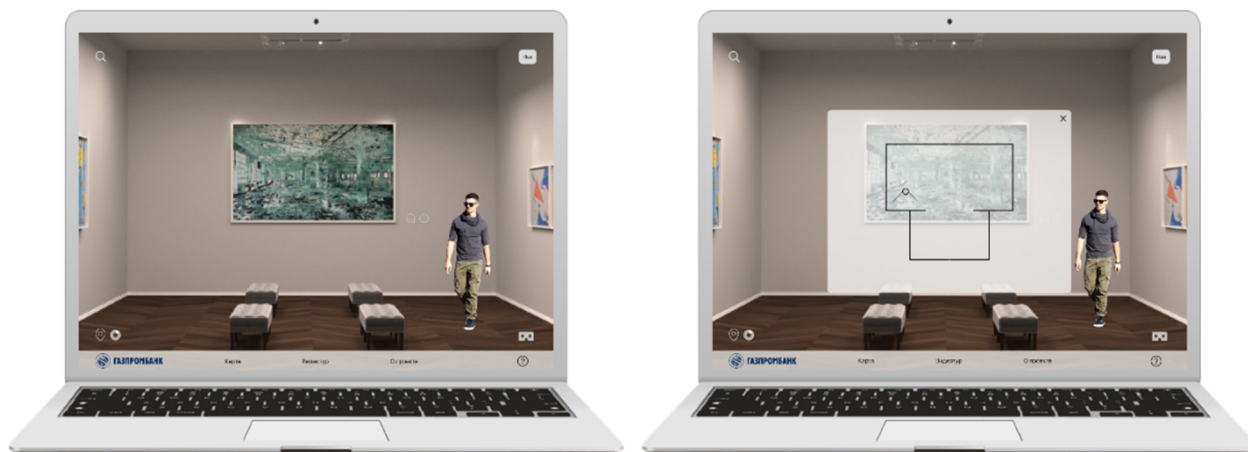


Рис. 6. Визуализация дизайна сайта

Юзабилити цифрового продукта требует также учитывать принципы универсальности, т.к. люди с ограниченными возможностями и инвалиды также активно используют цифровые технологии. Поэтому, например, при разработке десктопной или мобильной версии сайта необходимо проработать версию для незрячих или людей с ослабленным зрением.

Возможности универсального дизайна – тематика, разрабатываемая кафедрой компьютерного дизайна Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА [13–15].

Студенты кафедры компьютерного дизайна вовлечены в процесс исследований возможностей универсального дизайна. Проектирование объектов и среды на основе принципов универсального дизайна – один из важнейших аспектов обучения студентов кафедры.

В качестве примера разработок кафедры, учитывающих принципы универсального дизайна как в области промышленной, так и в области цифровой сферы, можно привести проект дизайна шлемофона – слухового аппарата с возможностями воздушной

и костной проводимости (рис. 7) Разработанное устройство позволяет повысить возможности восприятия звуков у людей с ослабленным слухом. Отличительной чертой устройства является дизайн, полностью основанный на профессиографических методах анализа эргономики человеческого тела. Виброизлучатели, предназначенные для восприятия звуков через костный скелет, расположены в области скуловых костей, обладающих, как показали исследования, максимальной костной проводимостью. Для удержания аппарата на голове разработана система крепежных дуг [15].

С 2016 г. на базе университета регулярно проводится научно-практическая конференция «Универсальный дизайн – равные возможности – комфортная среда», в рамках которой рассматриваются различные тенденции современного дизайна с позиций инклюзивности и универсальности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эволюция юзабилити имеет цикличную природу. На каждом этапе научно-технического прогресса образуется множество новых объектов и форм,



Рис. 7. Концепция бионического шлемофона для людей с ограниченными возможностями

большинство из которых со временем теряет актуальность и начинает восприниматься как архаичные и устаревшие. Те же, что проходят испытание временем, приходят к единой форме и используются в течение десятилетий. Избежать ошибок при проектировании изделий помогают принципы универсальности, учитывающие, в первую очередь, эргономику, безопасность и удобство использования. Эволюционное развитие в области цифрового дизайна и веб-технологий определяет удобство использования (юзабилити) разрабатываемых продуктов. Это способствует переходу от сложных форм к более простым в оформлении и формообразовании цифровых продуктов для широкого круга пользователей и людей с ограниченными возможностями.

Вклад авторов

И.Ю. Мамедова – обоснование концепции, проведение литературного анализа, редактирование статьи.

А.Э. Дрюкова – проведение исторического и сравнительного анализа развития юзабилити в дизайне.

Н.Е. Мильчакова – формулирование концепции юзабилити в области UI/UX дизайна с учетом исторического контекста и принципов универсальности, формулирование выводов.

Authors' contributions

I.Yu. Mamedova – concept development, literary analysis, and writing the text of the article.

A.E. Dryukova – conducting a historical and comparative analysis of the usability development in design.

N.E. Milchakova – formulation of the concept of usability in the field of UI/UX design taking into account the historical context and principles of universality, drawing conclusions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова М.Л., Кухта М.С., Лобацкая Р.М., Черных М.М., Мильчакова Н.Е. *Дизайн: учебник для вузов*. М.: МГУПИ; 2013. 142 с. ISBN 978-5-8068-0523-3
2. Кухта М.С., Куманин В.И., Соколова М.Л., Гольдшмидт М.Г. *Промышленный дизайн: учебник*. Томск: Изд-во ТПУ; 2013. 312 с. ISBN 978-5-4387-0205-4
3. Рунге В.Ф. *История дизайна, науки и техники*. М.: Архитектура-С; 2006. 368 с. ISBN 5-9647-0090-X
4. Куманин В.И., Кухта М.С. (под ред.) *Дизайн. Материалы. Технологии: энциклопедический словарь*. Томск: Изд-во ТПУ; 2011. 320 с. ISBN 978-5-98298-774-7
5. Куманин В.И. Антидизайн. *Труды Академии технической эстетики и дизайна*. 2015;2:5–6.
6. Куманин В.И. Эволюция дизайна в России в последнее столетие. *Труды Академии технической эстетики и дизайна*. 2013;1:29–30.
7. Луковский М.А. Современные технологии развития и разработки веб-сайтов на основе принципов эмоционального дизайна. *Наука и современность*. 2014;27:66–69.
8. Мильчакова Н.Е. Дизайн визуальных коммуникаций. *Труды Академии технической эстетики и дизайна*. 2013;1:22–24.
9. Морозов М.Д., Романов В.В. Роль эстетики в веб-дизайне. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2019;2(68):77–80.
10. Албагачиев А.Ю., Мамедова И.Ю., Соколова М.Л., Мильчакова Н.Е. Промышленный дизайн и применение принципов универсальности при проектировании технических изделий. *Вестник машиностроения*. 2017;11:84–86.
11. Соколова М.Л., Мильчакова Н.Е., Жигунова А.И. Концепция ответственности как современное мировоззрение дизайнера. *Российский технологический журнал*. 2020;8(2):109–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-109-121>

REFERENCES

1. Sokolova M.L., Kukhta M.S., Lobatskaya R.M., Chernykh M.M., Mil'chakova N.E. *Dizain (Design)*. Textbook. Moscow: MGUPI; 2013. 142 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8068-0523-3
2. Kukhta M.S., Kumanin V.I., Sokolova M.L., Gol'dshmidt M.G. *Proyshlennyy dizain (Industrial Design)*. Textbook. Tomsk: TPU; 2013. 312 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4387-0205-4
3. Runge V.F. *Istoriya dizaina, nauki i tekhniki (History of design, science and technology)*. Moscow: Arkhitektura-S; 2006. 368 p. (in Russ.). ISBN 5-9647-0090-X
4. Kumanin V.I., Kukhta M.S. (Eds.). *Dizain. Materialy. Tekhnologii: entsiklopedicheskii slovar' (Design. Materials. Technologies: Encyclopedic Dictionary)*. Tomsk: TPU; 2011. 320 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98298-774-7
5. Kumanin V.I. Anti-design. *Trudy Akademii tekhnicheskoi estetiki i dizaina = Proceedings of the Academy of Technical Aesthetics and Design*. 2015;2:5–6 (in Russ.).
6. Kumanin V.I. The evolution of design in Russia during the last century. *Trudy Akademii tekhnicheskoi estetiki i dizaina = Proceedings of the Academy of Technical Aesthetics and Design*. 2013;1:29–30 (in Russ.).
7. Lukovskii M.A. Modern technologies for the development and development of websites based on the principles of emotional design. *Nauka i sovremennost' = Science and Modernity*. 2014;27:66–69 (in Russ.).
8. Milchakova N.E. Design of visual communications. *Trudy Akademii tekhnicheskoi estetiki i dizaina = Proceedings of the Academy of Technical Aesthetics and Design*. 2013;1:22–24 (in Russ.).
9. Morozov M.D., Romanov V.V. Role of aesthetics in web design. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of the Astrakhan State Technical University*. 2019;2(68):77–80 (in Russ.).

12. Герцик Ю.Г., Герцик Ю.Г. Использование концепции универсального дизайна для повышения эффективности медицинских изделий скрининга, коррекции тугоухости и речевых нарушений. *Вторая российская научно-практическая конференция с международным участием «Универсальный дизайн – равные возможности – комфортная среда, 2018»*. Сборник докладов конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2018. С. 62–67.
13. Соколова М.Л., Денисюк Т.В. Области применения универсального и дисциплинарного дизайна. *Вторая российская научно-практическая конференция с международным участием «Универсальный дизайн – равные возможности – комфортная среда, 2018»*. Сборник докладов конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2018. С. 212–215.
14. Соколова М.Л. Современные проблемы направления «Технология художественной обработки материалов». *Российский технологический журнал*. 2017;5(1): 50–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-1-50-56>
15. Дадин М.В., Соловьев Я.В., Иванов А.М., Калинин А.В. Разработка дизайна слухового аппарата с возможностями воздушной и костной проводимости. *Сборник докладов Третьей Национальной научно-практической конференции с международным участием «Универсальный дизайн – равные возможности – комфортная среда, 2019»*. Сборник докладов конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2019. Р. 171–173.
10. Albagachiev A.Yu., Mammadova I.Yu., Sokolova M.L., Milchakova N.E. Industrial design and universality principles application in the process of technical products engineering. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2017;11:84–86 (in Russ.).
11. Sokolova M.L., Milchakova N.E., Zhigunova A.I. The concept of responsibility as the modern outlook of designer. *Russian Technological Journal*. 2020;8(2): 109–121 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-109-121>
12. Gertsik Yu.G., Gertsik Yu.G. Using the concept of universal design to improve the effectiveness of medical devices screening, correction of hearing loss and speech disorders. In: *The second Russian scientific and practical conference with international participation “Universal design – equal opportunities – a comfortable environment.”* Collection of conference reports. Moscow: MIREA; 2018. P. 62–67 (in Russ.).
13. Sokolova M.L., Denisjuk T.V. Areas of application of universal and disciplinary design. In: *The second Russian scientific and practical conference with international participation “Universal design – equal opportunities – a comfortable environment.”* Collection of conference reports. Moscow: MIREA; 2018. P. 212–215 (in Russ.).
14. Sokolova M.L. Modern problems of the course of “Technology for the decorative processing of materials.” *Russian Technological Journal*. 2017;5(1):50–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-1-50-56>
15. Dadin M.V., Soloviev Ya.V., Ivanov A.M., Kalinin A.V. Design development of a hearing aid with air and bone conduction capabilities. In: *Reports of the Third National Scientific and Practical Conference with international participation “Universal design – equal opportunities – a comfortable environment, 2019.”* Moscow: MIREA; 2019. P. 171–173 (in Russ.).

Об авторах

Мамедова Ирина Юрьевна, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой компьютерного дизайна Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: i_mamedova@mirea.ru. Scopus Author ID 57215912459.

Дрюкова Анна Эдуардовна, к.т.н., доцент, доцент кафедры компьютерного дизайна Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dryukova@mirea.ru.

Мильчакова Наталья Егоровна, к.т.н., доцент, доцент кафедры компьютерного дизайна Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: milchakova@mirea.ru. ResearcherID AAE-2051-2019, <https://orcid.org/0000-0003-3662-087X>

About the authors

Irina Yu. Mamedova, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Computer Design, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: i_mamedova@mirea.ru. Scopus Author ID 57215912459.

Anna E. Dryukova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Design, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dryukova@mirea.ru.

Natalia E. Milchakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Design, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: milchakova@mirea.ru. ResearcherID AAE-2051-2019, <https://orcid.org/0000-0003-3662-087X>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 31.05.2022 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 15.25.

Тираж 100 экз. Заказ № 451.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: **79641**.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print May 31, 2022.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 15.25.

100 copies. Order No. 451.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: **79641**.

