

ISSN 1817-3020 (Print)
ISSN 2542-193X (Online)

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия: Физика

2024

Том 24

Выпуск 1



IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY
PHYSICS



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

ИЗВЕСТИЯ

САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

Серия Физика, выпуск 1

Продолжение «Известий Императорского Николаевского Университета» 1910–1918, «Ученых записок СГУ» 1923–1962,
«Известий Саратовского университета. Новая серия» 2001–2004



Научный журнал
2024 Том 24

ISSN 1817-3020 (Print)
ISSN 2542-193X (Online)

Издается с 2005 года

СОДЕРЖАНИЕ

Научный отдел

Радиофизика, электроника, акустика

**Астахов С. В., Астахов О. В., Елизаров Е. М.,
Стрелкова Г. И., Астахов В. В.**

Влияние ангармоничности на мультистабильность
в автоколебательной системе с двумя степенями свободы

4

Научный отдел

Биофизика и медицинская физика

**Курбако А. В., Храмов А. Н., Боровкова Е. И., Дубинкина Е. С.,
Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Караваев А. С., Прохоров М. Д.**

Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического
состояния человека в процессе решения когнитивных задач

19

Демина П. А., Кожевников И. О., Абрамова А. М., Горячева И. Ю.

Оптическая маркировка индивидуальных клеток меланомы с использованием
фотоконвертируемых микрочастиц

30

Нанотехнологии, наноматериалы и метаматериалы

**Кочкуров Л. А., Волчков С. С., Васильков М. Ю., Плугин И. А.,
Климова А. А., Зимняков Д. А.**

Деградация проводимости низкоразмерных наноструктурированных
полупроводниковых слоев при длительном протекании постоянного тока

41

Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О.

Оценка смачиваемости наполнителя связующим в процессе изготовления препрега
с воздействием ультразвука для трехмерной печати филаментами,
армированными непрерывным углеродным волокном

52

Твердотельная электроника, микро- и наноэлектроника

Койгеров А. С.

Приборы на ПАВ на частотных гармониках. Особенности расчета параметров ПАВ
методом конечных элементов

62

**Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В.,
Кожевников А. В., Филимонов Ю. А.**

Каналирование поверхностных магнитостатических волн с помощью
декорирования металлами поверхности плёнок ферритов

76

Приложения

Personalia

Генина Э. А., Синичкин Ю. П.

Валерий Викторович Тучин (к 80-летию со дня рождения)

88

Журнал «Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Физика»» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Запись о регистрации СМИ ПИ № ФС77-76653 от 26 августа 2019 г.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского»

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (категория К1, специальности: 1.3.3, 1.3.4, 1.3.5, 1.3.6, 1.3.11, 1.3.19, 1.5.2, 2.2.2).

Журнал индексируется Scopus, RSCI, DOAJ

Подписной индекс издания 36015.

Подписку на печатные издания можно оформить в Интернет-каталоге ГК «Урал-Пресс» (ural-press.ru).

Журнал выходит 4 раза в год.

Цена свободная.

Электронная версия находится в открытом доступе (fizika.sgu.ru)

Директор издательства

Бучко Ирина Юрьевна

Редактор

Батищева Татьяна Федоровна

Художник

Соколов Дмитрий Валерьевич

Редактор-стилист

Агафонов Андрей Петрович

Верстка

Ковалева Наталья Владимировна

Технический редактор

Каргин Игорь Анатольевич

Корректор

Агафонов Андрей Петрович

Адрес учредителя, издателя и издательства (редакции):

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
Тел.: +7(845-2) 51-29-94, 51-45-49,
52-26-89

E-mail: publ@sgu.ru, izdat@sgu.ru

Подписано в печать 21.02.2024.

Подписано в свет 01.03.2024.

Формат 60 × 84 1/8.

Усл. печ. л. 11.43 (12.25).

Тираж 100 экз. Заказ 14-Т.

Отпечатано в типографии
Саратовского университета.

Адрес типографии:

410012, Саратов, Б. Казачья, 112А

© Саратовский университет, 2024



ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал публикует на русском и английском языках научные статьи по физике, содержащие новые результаты исследований, статьи учебно-методического характера, содержащие инновационную компоненту, статьи по методологии разделов физической науки, статьи, отражающие хронику научных мероприятий и важных событий в жизни физического сообщества.

Материалы, ранее опубликованные или представленные для публикации в другие журналы, к рассмотрению не принимаются. Рекомендуемый объем статьи – до 25 страниц текста, включая рисунки, таблицы и список литературы. На русском языке статья содержит: УДК, заглавие, инициалы и фамилии авторов, название их места работы, электронный адрес авторов, аннотацию (200–250 слов), ключевые слова, текст, благодарности и ссылки на гранты, список литературы.

На английском языке необходимо продублировать: заглавие, инициалы (имя – полностью) и фамилии авторов, структурированную аннотацию (250–600 слов), ключевые слова, список литературы (references). Для каждого автора указать ORCID.

Текст должен быть набран и напечатан через 1,5 интервала на бумаге формата А4 с полями 2,5 см, шрифт Times New Roman, размер шрифта текста – 14.

Текст статьи должен быть подписан всеми авторами.

Для публикации статьи необходимо загрузить на сайт журнала: текст статьи, оформленный согласно правилам журнала; направление от организации (отсканированное в формате pdf); лицензионный договор (отсканированный в формате pdf); экспертное заключение; согласие на обработку персональных данных.

Список литературы следует оформлять в соответствии с ГОСТ Р7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка». В списке литературы нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. В библиографическом списке должны быть указаны только процитированные в статье работы.

Все рукописи, поступившие в редколлегию и соответствующие профилю журнала, проходят рецензирование, а затем редколлегия принимает решение о возможности их опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается. Более подробно с правилами для авторов и порядком рецензирования можно ознакомиться на сайте журнала: <http://fizika.sgu.ru>

Адрес редколлегии серии: 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, СГУ имени Н. Г. Чернышевского, Институт физики

Тел./факс: +7 (8452) 52-27-05

E-mail: fizik@sgu.ru

Website: <https://fizika.sgu.ru>

CONTENTS

Scientific Part

Radiophysics, Electronics, Acoustics

Astakhov S. V., Astakhov O. V., Elizarov E. M., Strelkova G. I., Astakhov V. V.

Impact of anharmonicity on multistability in a self-sustained oscillatory system with two degrees of freedom

4

Biophysics and Medical Physics

Kurbako A. V., Hramkov A. N., Borovkova E. I., Dubinkina E. S., Ishbulatov Y. M., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D.

Hardware-software complex for diagnostics of a human psychophysiological state during the solving of cognitive tasks

19

Demina P. A., Kozhevnikov I. O., Abramova A. M., Goryacheva I. Yu.

Optical labeling of individual melanoma cells using photoconvertible microparticles

30

Nanotechnologies, Nanomaterials and Metamaterials

Kochkurov L. A., Volchkov S. S., Vasilkov M. Yu., Plugin I. A., Klimova A. A., Zimnyakov D. A.

Degradation of conductivity of low-dimensional nanostructured semiconductor layers under long-term dc current flow

41

Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O.

Evaluation of the wettability of the filler binder during the manufacture of prepreg with ultrasound exposure for three-dimensional printing filaments reinforced with continuous carbon fiber

52

Solid-State Electronics, Micro- and Nanoelectronics

Koigerov A. S.

SAW devices on frequency harmonics. Features of calculation of SAW parameters by the finite element method

62

Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Dzhumaliev A. S., Nikulin Y. V., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A.

Channeling of magnetostatic surface waves by decoration of ferrite films with metals

76

Appendices

Personalia

Genina E. A., Sinichkin Yu. P.

Valery Viktorovich Tuchin (On the 80th anniversary)

88



**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. НОВАЯ СЕРИЯ.
СЕРИЯ: ФИЗИКА»**

Главный редактор

Короновский Алексей Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Заместители главного редактора

Тучин Валерий Викторович, доктор физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН (Саратов, Россия)

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физ.-мат. наук, академик РАН (Москва, Россия)

Ответственный секретарь

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Аникин Валерий Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Бабков Лев Михайлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вадивасова Татьяна Евгеньевна, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Вениг Сергей Борисович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Виницкий Сергей Ильич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Дубна, Россия)

Горохов Александр Викторович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Самара, Россия)

Давидович Михаил Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Дюбуа Арно, Ph.D., профессор Университета Париж-Сакле (Сент-Обен, Франция)

Захарова Анна Сергеевна, доктор наук по физике (Dr. Habil), профессор Берлинского технического университета (Берлин, Германия)

Ларин Кирилл Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор Хьюстонского университета (Хьюстон, США)

Мельников Леонид Аркадьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Модельский Иосиф, Ph.D., профессор Варшавского Технологического университета (Варшава, Польша)

Нефёдов Игорь Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник Университета Аалто (Хельсинки, Финляндия)

Пирогов Юрий Андреевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

Сербино Роберто, Ph.D., профессор Миланского университета (Милан, Италия)

Скрипаль Александр Владимирович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Сухоруков Глеб Борисович, кандидат физ.-мат. наук, профессор Университета

Королевы Марии (Лондон, Великобритания)

Филимонов Юрий Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Хлебцов Николай Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Чигринов Владимир Григорьевич, доктор физ.-мат. наук, профессор Гонг Конгского университета науки и технологии (Гонг Конг, Китай)

Шараевский Юрий Павлович, доктор физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

**EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL
“IZVESTIYA OF SARATOV UNIVERSITY. PHYSICS”**

Editor-in-Chief – Aleksey A. Koronovskii (Saratov, Russia)

Deputy Editors-in-Chief – Valery V. Tuchin (Saratov, Russia))

Sergey A. Nikitov (Moscow, Russia)

Executive Secretary – Anatoly V. Skripal (Saratov, Russia)

Members of the Editorial Board:

Valery M. Anikin (Saratov, Russia)

Lev M. Babkov (Saratov, Russia)

Roberto Cerbino (Milan, Italy)

Vladimir G. Chigrinov (Hong Kong, China)

Michael V. Davidovich (Saratov, Russia)

Arnaud Dubois (Saint-Aubin, France)

Yuri A. Filimonov (Saratov, Russia)

Alexander V. Gorokhov (Samara, Russia)

Anna S. Zakharova (Berlin, Germany)

Nikolai G. Khlebtsov (Saratov, Russia)

Kirill V. Larin (Houston, USA)

Igor S. Nefedov (Helsinki, Finland)

Leonid A. Melnikov (Saratov, Russia)

Joseph Modelski (Warsaw, Poland)

Yuri A. Pirogov (Moscow, Russia)

Yuri P. Sharaevsky (Saratov, Russia)

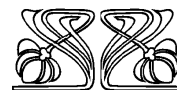
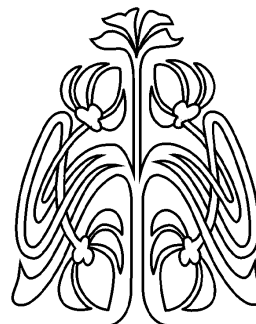
Alexander V. Skripal (Saratov, Russia)

Gleb B. Sukhorukov (London, UK)

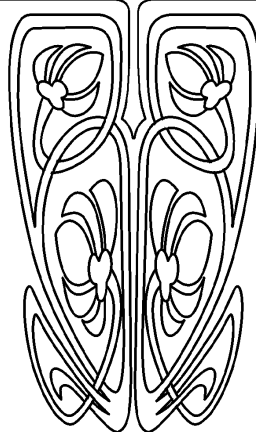
Tatyana E. Vadivasova (Saratov, Russia)

Sergey I. Vinitzky (Dubna, Russia)

Sergey B. Venig (Saratov, Russia)



**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**





РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 4–18
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 4–18
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-4-18>, EDN: SGQUIN

Научная статья
УДК 530.182

Влияние ангармоничности на мультистабильность в автоколебательной системе с двумя степенями свободы

С. В. Астахов¹, О. В. Астахов², Е. М. Елизаров³, Г. И. Стрелкова^{3✉}, В. В. Астахов³

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

²Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус», Россия, 354340, Краснодарский край, пгт. Сириус, Олимпийский пр-т, д. 1

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Астахов Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра квантовых технологий физического факультета, s.v.astakhov@quantum.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-1919>, AuthorID: 936913

Астахов Олег Владимирович, кандидат физико-математических наук, руководитель приемной комиссии, astahov.ov@talantiuspeh.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3798-5774>, AuthorID: 547443

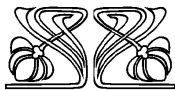
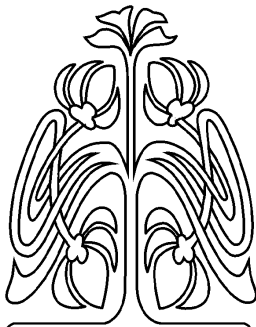
Елизаров Евгений Михайлович, инженер и аспирант кафедры радиофизики и нелинейной динамики, elizarovem5@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8309-6197>, AuthorID: 1162456

Стрелкова Галина Ивановна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики, strelkovagi@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8667-2742>, AuthorID: 34836

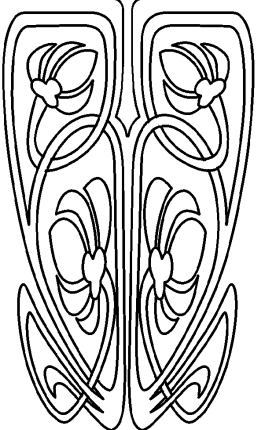
Астахов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики, astakhovvv@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-9597-6214>, AuthorID: 34841

Аннотация. Простейшей классической автоколебательной системой с двумя степенями свободы является генератор Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром. Для нее характерно явление затягивания частоты, обусловленное появлением бистабильности и гистерезиса. Ранее был выявлен бифуркационный механизм затягивания и бистабильности. Бифуркационный анализ был проведен для случая слабого возбуждения, когда система демонстрирует квазигармонические автоколебания. Однако остается открытым вопрос о влиянии ангармоничности, которая развивается в системе с ростом параметра возбуждения, на явление мультистабильности, на бифуркационный механизм ее формирования. Сохраняется ли эффект затягивания частоты и соответствующие бистабильные состояния в широкой области значений управляющих параметров? Происходит ли формирование новых мультистабильных состояний? Как выглядит бифуркационная структура плоскости управляющих параметров? В данной работе перечисленные вопросы исследуются на примере автоколебательной системы, состоящей из осциллятора Рэлея с дополнительным линейным осциллятором. Численное моделирование и бифуркационный анализ состояний равновесия и предельных циклов выполнены с помощью пакета программ ХРРАУТО. Представлены результаты двупараметрического анализа в широкой области значений параметра возбуждения и расстройки по частотам, описаны типичные режимы автоколебаний и их бифуркации.

Ключевые слова: осциллятор Рэлея, затягивание частоты, мультистабильность, гистерезис, бифуркационный анализ



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00119, <https://rscf.ru/project/23-12-45017/>).

Для цитирования: Астахов С. В., Астахов О. В., Елизаров Е. М., Стрелкова Г. И., Астахов В. В. Влияние ангармоничности на мультистабильность в автоколебательной системе с двумя степенями свободы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 4–18. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-4-18>, EDN: SGQUIN

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Impact of anharmonicity on multistability in a self-sustained oscillatory system with two degrees of freedom

S. V. Astakhov¹, O. V. Astakhov², E. M. Elizarov³, G. I. Strelkova³✉, V. V. Astakhov³

¹Lomonosov Moscow State University, GSP-1 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

²Sirius University of Science and Technology, 1 Olimpiyskiy Pr., urban settlement Sirius, Krasnodar region 354340, Russia

³Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Sergey V. Astakhov, s.v.astakhov@quantum.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-1919>, AuthorID: 936913

Oleg V. Astakhov, astahov.ov@talantiuspeh.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3798-5774>, AuthorID: 547443

Evgeny M. Elizarov, elizarovem5@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8309-6197>, AuthorID: 1162456

Galina I. Strelkova, strelkovagi@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8667-2742>, AuthorID: 34836

Vladimir V. Astakhov, astakhovvv@icloud.com, <https://orcid.org/0000-0001-9597-6214>, AuthorID: 34841

Abstract. Background and Objectives: The van der Pole oscillator with an additional oscillatory circuit represents one of the simplest self-sustained oscillator system with two degrees of freedom. It is characterized by the phenomenon of frequency pulling, caused by the appearance of bistability and hysteresis. The bifurcation mechanism of pulling and bistability was previously identified, and the bifurcation analysis was carried out for the case of weak excitation when the system exhibits quasi-harmonic self-sustained oscillations. However, the question remains open about the influence of anharmonicity, which develops in the system with increasing excitation parameter, on the phenomenon of multistability and on the bifurcation mechanism of its formation. Is the effect of frequency pulling and the corresponding bistable states preserved over a wide range of values of the control parameters? Are new multistable states being formed? What does the bifurcation structure of the control parameter plane look like? In this paper, the above issues are studied using as an example a self-sustained oscillatory system consisting of the Rayleigh oscillator with an additional linear oscillator. **Materials and Methods:** Numerical simulation and bifurcation analysis of equilibrium states and limit cycles were performed using the XPPAUTO software package. **Results:** The results of a two-parameter analysis in a wide range of excitation and frequency detuning parameters have been presented, typical modes of self-sustained oscillations and their bifurcations have been described. **Conclusion:** It has been shown that the classical phenomenon of frequency pulling is observed only at small values of the excitation parameter of the system. The bistability region, where two limit cycles coexist, corresponding to in-phase and anti-phase oscillation modes in coupled oscillators, is bounded by both the detuning parameter and the excitation parameter.

Keywords: Rayleigh oscillator, frequency pulling, multistability, hysteresis, bifurcation analysis

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-12-00119, <https://rscf.ru/project/23-12-45017/>).

For citation: Astakhov S. V., Astakhov O. V., Elizarov E. M., Strelkova G. I., Astakhov V. V. Impact of anharmonicity on multistability in a self-sustained oscillatory system with two degrees of freedom. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 4–18 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-4-18>, EDN: SGQUIN

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Мультистабильность является фундаментальным нелинейным явлением, которое широко наблюдается и активно исследуется в системах различной природы [1–13]. Под этим явлением понимают сосуществование в фазовом пространстве динамической системы нескольких аттракторов, которые можно пронаблюдать, меняя начальные условия системы. Мультистабильность имеет важное, зачастую определяющее значение в свойствах и функциональных возможностях различных систем. Например, установлено, что мультистабильность лежит в основе механизмов хранения памяти

и обработки информации в нейронных сетях [14]. В ряде случаев она играет отрицательную роль, понижая устойчивость системы к воздействию флуктуаций, помех, что приводит к нарушению режимов работы технических устройств [1, 15].

В связи с этим важно знать условия возникновения и исчезновения мультистабильности при вариации параметров системы, бифуркационные механизмы ее формирования. Возникновение мультистабильности может быть связано с бифуркациями типа вил состояний равновесия и предельных циклов, с седло-узловыми бифуркациями рождения пар неподвижных точек или предельных циклов, когда в расширенном



пространстве динамических переменных и параметров системы формируются складки и сборки для неподвижных точек и предельных циклов [16, 17]. В связанных системах с удвоением периода возможно формирование развитой фазовой мультистабильности [18], когда при переходе к хаосу через каскад удвоений периода каждый из циклов претерпевает бифуркацию удвоения дважды. После первой бифуркации рождается устойчивый цикл удвоенного периода, после второй – седловой. Далее по параметру неустойчивый цикл претерпевает субкритическую бифуркацию вил и становится устойчивым [19]. Возникающие режимы одного периода различаются фазовыми сдвигами между колебаниями подсистем. В результате в фазовом пространстве могут сосуществовать циклы одного периода, разных периодов, торы и различные виды хаотических аттракторов.

При исследовании бифуркационного механизма затягивания частоты в классической автоколебательной системе с двумя степенями свободы [20, 21] – в генераторе Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром – было установлено [22, 23], что появление сосуществующих устойчивых предельных циклов в области затягивания частоты обусловлено двумя последовательными суперкритическими бифуркациями Андронова–Хопфа состояния равновесия и субкритической бифуркацией Неймарка–Сакера седлового предельного цикла. Этот бифуркационный механизм формирования бистабильности был выявлен при малых значениях параметра возбуждения в генераторе и слабой диссипации в дополнительном колебательном контуре, когда система является квазигармонической. Однако для подобных автоколебательных систем с двумя степенями свободы остается открытым вопрос о влиянии параметра возбуждения, когда с его увеличением автоколебания становятся ангармоническими, на явление мультистабильности, на бифуркационный механизм ее формирования. Сохраняется ли эффект затягивания частоты и соответствующие бистабильные состояния в широкой области значений на плоскости управляющих параметров возбуждения и расстройки по собственным частотам? Происходит ли формирование новых мультистабильных состояний? Как выглядит бифуркационная структура плоскости управляющих параметров?

В статье представлены результаты дупараметрического анализа автоколебательной системы с двумя степенями свободы, состоящей

из осциллятора Рэля, взаимодействующего с линейным диссипативным осциллятором. На плоскости «параметр возбуждения – параметр расстройки по собственным частотам» построены области характерных режимов, выявлены области мультистабильности и определены бифуркации, которые приводят к сосуществующим аттракторам. В данной автоколебательной системе с двумя степенями свободы

Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлена исследуемая модель автоколебательной системы с двумя степенями свободы. В разделе 3 описаны результаты численного моделирования и бифуркационного анализа состояний равновесия и предельных циклов, выполненных с помощью пакета программ ХРРАУТО [24]. В разделе 4 проведено обсуждение полученных результатов.

1. Исследуемая система

1.1. Математическая модель

Исследуемая автоколебательная система с двумя степенями свободы состоит из осциллятора Рэля, взаимодействующего с линейным диссипативным осциллятором.

Осциллятор Рэля относится к базовым моделям теории колебаний. Он представляет собой одну из простейших моделей автоколебательных систем с одной степенью свободы. Уравнение Рэля [25] описывает, например, хорошо известные механические автоколебательные системы – маятник Фроуда [26] и систему Кайдановского–Хайкина [27]. Примером радиофизической системы, описываемой уравнением Рэля, может служить генератор на нелинейном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью, включенном в колебательный контур [28]. Осциллятор Рэля представляет собой осциллятор с нелинейной диссипацией, величина которой нелинейно зависит от скорости (в механической интерпретации), тогда как в осцилляторе Ван дер Поля диссипация определяется координатой по нелинейному закону. Заменой переменных уравнение Рэля переходит в уравнение Ван дер Поля.

В осцилляторе Рэля, так же как и в генераторе Ван дер Поля, наблюдается мягкое возбуждение устойчивых автоколебаний. Единственное состояние равновесия с ростом управляющего параметра при переходе через нулевое значение претерпевает суперкритическую бифуркацию Андронова–Хопфа. Из неустойчивого фокуса рождается устойчивый предельный цикл,



радиус которого растет пропорционально корню из надкритичности. При малых значениях параметра наблюдаются квазигармонические автоколебания. С ростом управляющего параметра развивается явление ангармоничности. Близкие к синусоидальным автоколебания постепенно превращаются в релаксационные. Однако в осцилляторе Ван дер Поля форма временных реализаций становится прямоугольной, а в осцилляторе Рэля – пилообразной.

Исследуемая автоколебательная система с двумя степенями свободы может быть представлена в виде двух связанных осцилляторов:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - (\varepsilon - \dot{x}^2)\dot{x} + p^2x + p^2\gamma(x - x_1) &= 0, \\ \ddot{x}_1 + \alpha\dot{x}_1 + x_1 + \gamma(x_1 - x) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

или описана системой четырех дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= (\varepsilon - y^2)y - p^2x - p^2\gamma(x - x_1), \\ \dot{x}_1 &= y_1, \\ \dot{y}_1 &= -\alpha y_1 - x_1 - \gamma(x_1 - x). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь пары динамических переменных (x, y) и (x_1, y_1) определяют состояние осциллятора Рэля (основного контура) и линейного диссипативного осциллятора (дополнительного контура) соответственно; ε – параметр возбуждения автоколебательной системы; α – параметр диссипации линейного осциллятора; γ – коэффициент связи между осциллятором Рэля и линейным осциллятором; p – параметр расстройки по собственным частотам осциллятора Рэля и линейного осциллятора.

Такие уравнения можно получить при описании, например, механической автоколебательной системы Кайдановского–Хайкина [27, 21, 25], состоящей из грузика, закрепленного на пружине и расположенного на движущейся с постоянной скоростью ленте, который взаимодействует с другим грузиком, закрепленным на пружине и расположенным на покоящейся поверхности. Радиофизическим примером такой системы является генератор, состоящий из двух связанных колебательных контуров, один из которых возбуждается активным нелинейным элементом с отрицательной дифференциальной проводимостью.

1.2. Двухконтурный генератор на активном нелинейном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью

На рис. 1 представлена схема генератора на активном нелинейном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью и двумя колебательными контурами.

Исходя из приведенной схемы и используя законы Кирхгофа, запишем уравнения:

$$\begin{aligned} I + i_g + i_c + i + I_c &= 0, \\ i_1 + i_{g1} + i_{c1} - I_c &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Вольт-амперную характеристику нелинейного элемента определим в виде

$$I = -au + bu^3. \quad (4)$$

Указанные на рис. 1 токи и напряжения на элементах схемы связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} i_g &= gu, & i_c &= C \frac{du}{dt}, & u &= L \frac{di}{dt}, & u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt}, \\ i_{g1} &= g_1 u_1, & i_{c1} &= C_1 \frac{du_1}{dt}, & u - u_1 &= L_c \frac{dI_c}{dt}. \end{aligned}$$

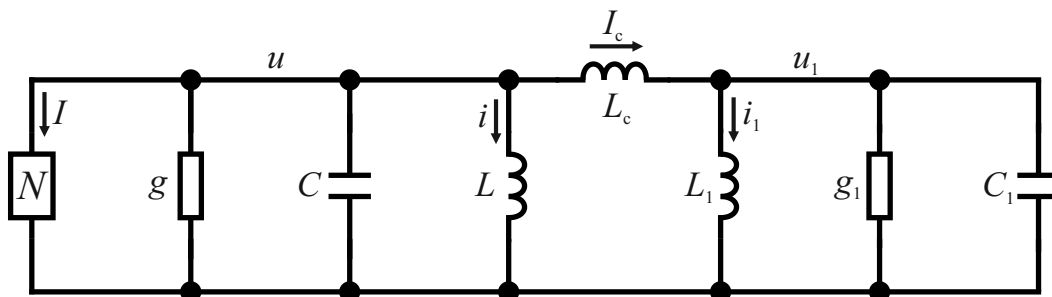


Рис. 1. Схема генератора на активном нелинейном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью и двумя колебательными контурами

Fig. 1. Scheme of a generator based on an active nonlinear element with a negative differential conductivity and two oscillatory circuits



Подставляя данные соотношения в (3) с учетом (4), запишем уравнения относительно токов i и i_1 :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} \left[\frac{a-g}{C} - \frac{bL^2}{C} \left(\frac{di}{dt} \right)^2 \right] \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i + \frac{1}{LC} \left(\frac{L}{L_c} i - \frac{L_1}{L_c} i_1 \right) = 0,$$

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + \frac{g_1}{C_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{L_1 C_1} i_1 + \frac{1}{L_1 C_1} \left(\frac{L_1}{L_c} i_1 - \frac{L}{L_c} i \right) = 0.$$

Переходя к новому времени, нормированным переменным и параметрам, эту систему можно представить в виде (1) и (2), где

$$x = \sqrt{\beta} \frac{i}{i_0}, \quad x_1 = \sqrt{\beta} \frac{i_1}{i_0}, \quad \beta = \frac{bL^2 i_0^2}{C \sqrt{L_1 C_1}}, \quad \dot{x} = \frac{dx}{d\tau},$$

$$\tau = \omega_{01} t, \quad p^2 = \frac{\omega_0^2}{\omega_{01}^2}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_{01}^2 = \frac{1}{L_1 C_1},$$

$$\varepsilon = \frac{a-g}{C \omega_{01}}, \quad \alpha = \frac{g_1}{\omega_{01} C_1}, \quad \gamma = \frac{L}{L_c}, \quad L_1 = L.$$

Таким образом, изображенный на рис. 1 двухконтурный генератор на нелинейном элементе с отрицательной дифференциальной проводимостью представляет собой осциллятор Рэлея, взаимодействующий с линейным диссипативным осциллятором (1).

2. Мультистабильные состояния и бифуркации, приводящие к их появлению

Автоколебательная система (2) имеет четырехмерное фазовое пространство с единственным состоянием равновесия в начале координат, положение которого не зависит от параметров системы. В отсутствие связи ($\gamma = 0$) система распадается на осциллятор Рэлея и линейный диссипативный осциллятор. При малых положительных значениях параметра диссипации α линейный осциллятор при любых начальных условиях демонстрирует затухающие до нуля колебания. Поведение осциллятора Рэлея зависит от параметра возбуждения ε . При отрицательных значениях параметра автоколебания отсутствуют. Единственное состояние равновесия является устойчивым, причем при $\varepsilon < -2$ представляет собой устойчивый узел и при $-2 < \varepsilon < 0$ – устойчивый фокус. Когда ε переходит через ноль, происходит возбуждение автоколебаний. В результате суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа из неустойчивого фокуса рождается устойчивый предельный цикл. При малых значениях параметра возбуждения ε осциллятор Рэлея демонстрирует квазигармонические автоколебания. По мере увеличения ε развивается явление ангармоничности, колебания постепенно превращаются из квазигармонических в релаксационные пилообразной формы.

При взаимодействии этих двух осцилляторов с очень простым поведением возникают более сложные явления, а именно формируется мультистабильность, происходит затягивание частоты и гистерезис. В пространстве параметров наблюдается более сложная бифуркационная структура, определяющая механизмы появления мультистабильности.

Рассмотрим поведение системы (2) в зависимости от параметра возбуждения ε и расстройки по собственным частотам p с фиксированными значениями параметра диссипации $\alpha = 0.01$ и коэффициента связи $\gamma = 0.2$.

В автоколебательной системе (2) с увеличением ε мягко возбуждаются квазигармонические автоколебания. Однако при значениях p немного меньше единицы рождается устойчивый предельный цикл, соответствующий синфазным колебаниям в основном и дополнительном контуре, а при p немного больше единицы – устойчивый предельный цикл, соответствующий противофазным колебаниям в контурах. Проекция этих предельных циклов, обозначенные C_1 для синфазных и C_2 для противофазных колебаний, представлены на рис. 2. Эти два цикла участвуют в явлении затягивания частоты, их области существования перекрываются на плоскости параметров, что приводит к мультистабильности и гистерезису. Рассмотрим бифуркации состояния равновесия и предельных циклов, которые определяют эти явления.

На рис. 3 построены бифуркационные линии на плоскости управляющих параметров (ε, p) в диапазоне малых значений ε (от 0 до 0.1), когда автоколебания близки к гармоническим.

Ниже линий l_1^{AH1} и l_2^{AH1} автоколебания отсутствуют. В фазовом пространстве существует устойчивое состояние равновесия. Вблизи бифуркационных линий оно представляет собой устойчивый фокус: все четыре собственных значения являются комплексными с отрицательными действительными частями. Когда $p < 1$, при пересечении линии l_1^{AH1} действительные части одной пары собственных значений переходят через ноль и становятся положительными. Неподвижная точка превращается в седло, в ее окрестности мягко рождается устойчивый предельный цикл C_1 . С ростом параметра возбуждения, при пересечении линии l_2^{AH2} , состояние равновесия претерпевает еще одну суперкритическую бифуркацию Андронова–Хопфа. Действительные части еще одной пары комплексных собственных значений переходят через ноль. Из седловой

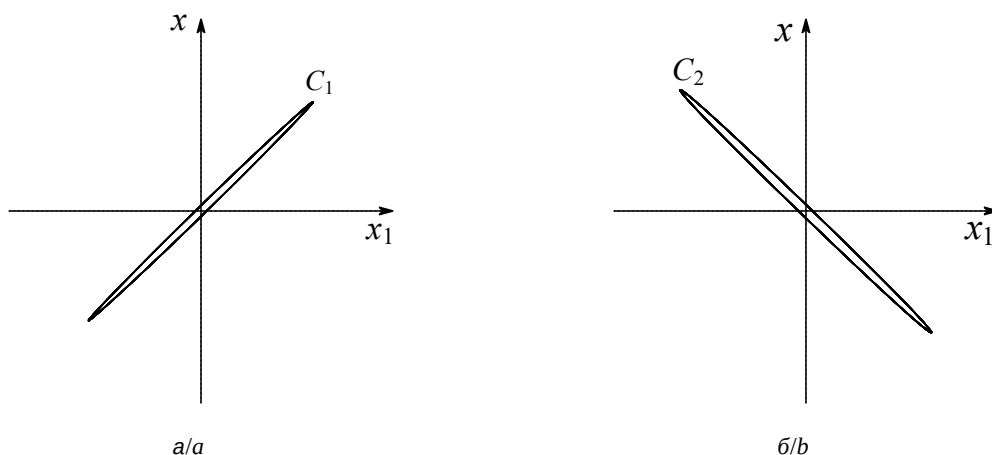


Рис. 2. Проекция предельных циклов C_1 (а) и C_2 (б), соответствующие синфазным и противофазным колебаниям в осцилляторах, при $\epsilon = 0.05$, $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $p = 0.995$ (а), $p = 1.005$ (б)
 Fig. 2. Projections of limit cycles C_1 (a) and C_2 (b) corresponding to in-phase and anti-phase oscillations in the oscillators at $\epsilon = 0.05$, $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.2$, $p = 0.995$ (a), $p = 1.005$ (b)

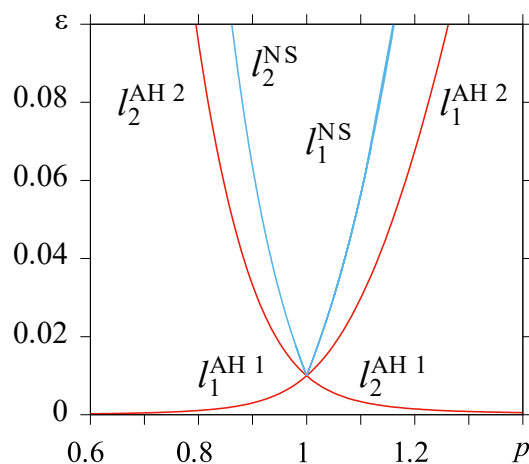


Рис. 3. Линии бифуркационных значений на плоскости управляющих параметров (p, ϵ) в диапазоне малых значений ϵ при фиксированных $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.2$. Линии I_1^{AH1} , I_2^{AH1} соответствуют суперкритическим бифуркациям Андронова–Хопфа. При их пересечении из состояния равновесия рождаются устойчивые циклы C_1 и C_2 соответственно. На линиях I_1^{AH2} и I_2^{AH2} из седлового состояния равновесия рождаются седловые циклы C_1 и C_2 . Линии I_1^{NS} и I_2^{NS} соответствуют субкритическим бифуркациям Неймарка–Сакера, при которых седловые циклы C_1 и C_2 становятся устойчивыми (цвет онлайн)

Fig. 3. Bifurcation lines in the (p, ϵ) parameter plane within a range of small values of ϵ at fixed $\alpha = 0.01$, $\gamma = 0.2$. Lines I_1^{AH1} , I_2^{AH1} correspond to supercritical Andronov–Hopf bifurcations. When they intersect, stable cycles C_1 and C_2 are born from the equilibrium state, respectively. Saddle cycles C_1 and C_2 appear from a saddle equilibrium on lines I_1^{AH2} and I_2^{AH2} . Lines I_1^{NS} and I_2^{NS} refer to subcritical Neimark–Saker bifurcations at which the saddle cycles C_1 and C_2 become stable (color online)

неподвижной точки рождается неустойчивый предельный цикл C_2 . Он имеет четыре мульти-

пликатора, один из которых равен единице, один действительный и по модулю меньше единицы и пара комплексных, расположенных за единичной окружностью на плоскости с координатами $(Re(\mu), Im(\mu))$. На линии I_2^{NS} этот седловой предельный цикл C_2 претерпевает субкритическую бифуркацию Неймарка–Сакера. Пара комплексно-сопряженных мультипликаторов становится чисто мнимыми, из цикла рождается седловой тор, и C_2 становится устойчивым. Теперь в фазовом пространстве сосуществуют два устойчивых предельных цикла C_1 и C_2 . Следует отметить, что точно такой же бифуркационный механизм формирования бистабильности был выявлен и описан в работах [22, 23] для генератора Ван дер Поля с дополнительным контуром. Используя укороченные уравнения для амплитуд и фаз, авторы явно продемонстрировали рождение седлового тора при возникновении бистабильности.

Когда $p > 1$, происходят аналогичные бифуркации с той разницей, что при пересечении линии I_2^{AH1} в результате суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа из устойчивого состояния равновесия рождается устойчивый предельный цикл C_2 . Вторая суперкритическая бифуркация Андронова–Хопфа на линии I_1^{AH2} приводит к появлению седлового цикла C_1 , который становится устойчивым при пересечении линии I_1^{NS} в результате субкритической бифуркации Неймарка–Сакера. Область бистабильности, в которой сосуществуют устойчивые предельные циклы C_1 и C_2 , гистерезиса и затягивания частоты ограничена бифуркационными линиями I_1^{NS} и I_2^{NS} .



Как видно из рис. 3, эта область затягивания частоты располагается в окрестности линии $p = 1$ с отстройкой по частоте вправо и влево. При $\epsilon = 0.1$ интервал затягивания ограничен значениями p примерно от 0.7 до 1.3. С уменьшением ϵ этот интервал сужается и постепенно стягивается в точку. При фиксированном значении параметра возбуждения, например, $\epsilon = 0.08$, с изменением параметра расстройки по частоте p система демонстрирует следующее поведение. Если расстройка по собственным частотам существенно отличается от единицы, например, $p = 0.6$, в фазовом пространстве существует устойчивый предельный цикл C_1 . Других устойчивых режимов здесь нет. При плавном увеличении p устойчивый цикл C_1 наблюдается до точки пересечения с линией l_1^{NS} . Затем происходит жесткий переход на режим автоколебаний с другой амплитудой и частотой, который соответствует устойчивому предельному циклу C_2 . Далее, до конца исследуемого интервала значений $p = 1.4$, наблюдается C_2 . При обратном движении по параметру p , при пересечении линии l_1^{NS} цикл C_2 бифуркаций не претерпевает, сохраняется прежний автоколебательный режим. Жесткий переход на устойчивый цикл C_1 происходит существенно дальше по параметру – при пересечении линии l_2^{NS} . Наблюдается явление гистерезиса. Здесь имеет место классическая картина затягивания частоты в генераторе с дополнительным контуром.

Таким образом, в области малых значений параметра возбуждения формирование мультистабильности происходит в результате двух последовательных суперкритических бифуркаций Андронова–Хопфа состояния равновесия и одной субкритической бифуркации Неймарка–Сакера седлового предельного цикла.

Далее рассмотрим поведение осциллятора Рэлея, взаимодействующего с линейным осциллятором, в широкой области значений параметра возбуждения ϵ от 0 до 10 при расстройке по собственным частотам p от 0.3 до 1.7 на базе каждого из сосуществующих бистабильных состояний C_1 и C_2 . На рис. 4 построены отдельные карты режимов с наследованием начальных условий на базе каждого из указанных циклов.

Устойчивый предельный цикл C_2 существует на плоскости управляющих параметров (ϵ, p) в области, ограниченной линией l_2 (рис. 4, а). При $p > 1$ с уменьшением параметра возбуждения ϵ цикл C_2 стягивается в неподвижную точку. Здесь границей является линия суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа мягкого рождения устойчивого цикла C_2 из неустойчивого фокуса. Остальная часть границы и слева, и сверху определяется линией субкритической бифуркации Неймарка–Сакера. На ней предельный цикл C_2 не исчезает, а теряет устойчивость. Изображающая точка уходит с него на устойчивый цикл C_1 . Таким образом, жесткий переход с C_2 на C_1 происходит не только с уменьшением параметра расстройки по собственным частотам, но и при

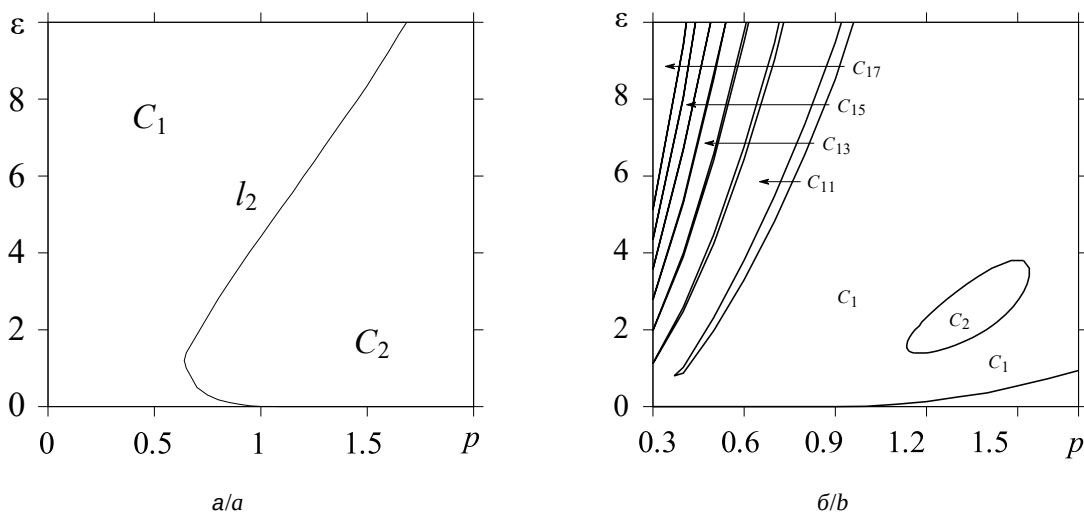


Рис. 4. Карты режимов на плоскости управляющих параметров (p, ϵ) , возникающие в системе (2) на базе противофазного цикла C_2 (а) и синфазного цикла C_1 (б). Линия l_2 на фрагменте (а) ограничивает область существования цикла C_2

Fig. 4. Regime maps in the (p, ϵ) parameter plane in the system (2) on the base of anti-phase cycle C_2 (a) and in-phase cycle C_1 (b). Line l_2 in fragment (a) bounds the region of cycle C_2 existence



увеличении параметра возбуждения. При вариации параметров внутри этой области устойчивый предельный цикл C_2 бифуркаций не претерпевает. Однако характеристики колебаний (форма, амплитуда, период) в основном и дополнительном контурах существенно меняются. Проекция фазовых портретов и временные реализации этого семейства автоколебательных режимов представлены на рис. 5.

Видно, что при $p = 1.0$ и малых значениях параметра возбуждения ($\epsilon = 0.05, 0.1$, рис. 5, а, б) в основном и дополнительном колебательном контурах наблюдаются квазигармонические противофазные колебания практически одинаковой амплитуды. В сечении $\epsilon = 0.05$ при изменении расстройки по частоте от $p = 0.92$ до $p = 1.7$ колебания остаются квазигармоническими, но меняется их период (примерно от $T = 5.5$ до $T = 3.5$) и амплитуды в основном A и дополнительном A_1 контурах. Так, при $p = 1.0$ амплитуды колебаний одинаковые: $A = A_1 = 0.19$, а при $p = 1.7$ амплитуда колебаний в основном контуре ($A = 0.13$) становится больше, чем в дополнительном ($A_1 = 0.01$).

Из рис. 5 видно, что при $p = 1.0$ с увеличением параметра возбуждения ϵ от нижней до верхней границы области существования автоколебательный режим на базе предельного цикла C_2 заметно видоизменяется. Колебания в дополнительном контуре во всем диапазоне значений остаются квазигармоническими, а в основном контуре плавно превращаются в релаксационные пилообразной формы. Различие в интенсивности колебаний постепенно нарастает и становится довольно существенным у верхней границы области ($A = 2.17, A_1 = 10.39$ при $\epsilon = 4.0$, рис. 5, е).

Карта режимов на плоскости параметров (p, ϵ) на базе синфазного цикла C_1 (см. рис. 4, б) устроена более сложным образом. В исследуемой области значений она ограничена только снизу линией l_1 . При $p < 1$ на ней происходит суперкритическая бифуркация Андронова–Хопфа. При уменьшении параметра возбуждения устойчивый предельный цикл C_1 плавно стягивается в неподвижную точку в начале координат. При $p > 1$ у нижней границы цикла имеет конечный размер. При пересечении границы происходит жесткий перескок с цикла C_1 на устойчивый цикл C_2 . Здесь происходит субкритическая бифуркация Неймарка–Сакера, в результате которой C_1 теряет устойчивость и изображающая точка уходит на устойчивый C_2 . Из рис. 4, б видно, что при малой расстройке (в окрестности $p = 1$)

с увеличением параметра возбуждения ϵ вплоть до границы исследуемого диапазона предельный цикл C_1 никаких бифуркаций не претерпевает. Однако при увеличении расстройки вправо и влево от $p = 1$ с ростом параметра возбуждения ϵ на базе предельного цикла C_1 наблюдаются различные бифуркации. В правой стороне плоскости параметров имеется область, ограниченная линией l_1^{NS} , при входе в которую происходит жесткий переход с цикла C_1 на устойчивый предельный цикл C_2 . На линии l_1^{NS} происходит субкритическая бифуркация Неймарка–Сакера. Рассмотрим поведение цикла C_1 при пересечении этой области снизу вверх, например, при фиксированном $p = 1.3$ с увеличением параметра возбуждения ϵ . При достижении линии l_1^{NS} снизу пара комплексно-сопряженных мультипликаторов выходит на единичную окружность. При пересечении границы цикл C_1 теряет устойчивость, но в его окрестности устойчивый тор не возникает, что свидетельствует о субкритической бифуркации Неймарка–Сакера. Здесь седловой тор стягивается к предельному циклу, C_1 теряет устойчивость, но не исчезает. С дальнейшим увеличением параметра возбуждения на верхней части границы l_1^{NS} пара мультипликаторов седлового цикла C_1 вновь входит в единичную окружность, предельный цикл становится устойчивым. Далее, до $\epsilon = 10$ цикл C_1 никаких бифуркаций не демонстрирует.

Более сложное поведение на базе предельного цикла C_1 наблюдается в левой части плоскости параметров при $p < 1$ (см. рис. 4, б). Здесь гораздо больше различных бифуркационных линий в отличие от правой части плоскости параметров. Рассмотрим, как меняются режимы колебаний на базе цикла C_1 при вариации управляющих параметров.

На рис. 6 представлены проекции предельных циклов, наблюдаемые в сечении $p = 0.5$ при различных значениях параметра возбуждения. При $\epsilon = 0.1$ все еще наблюдаются квазигармонические колебания (рис. 6, а). В интервале значений ϵ от 0.1 до 2.31 предельный цикл C_1 бифуркаций не претерпевает. Однако по мере увеличения ϵ форма его постепенно (эволюционно, без бифуркаций) искажается, предельный цикл при $\epsilon = 1.6$ (рис. 6, б) и $\epsilon = 2.31$ (рис. 6, в) по своей форме сильно отличается от C_1 при $\epsilon = 0.1$. Далее, при небольшом приращении по параметру до $\epsilon = 2.32$ происходит жесткий переход на другой предельный цикл, проекция которого показана на рис. 6, г. Обозначим его C_{11} . При

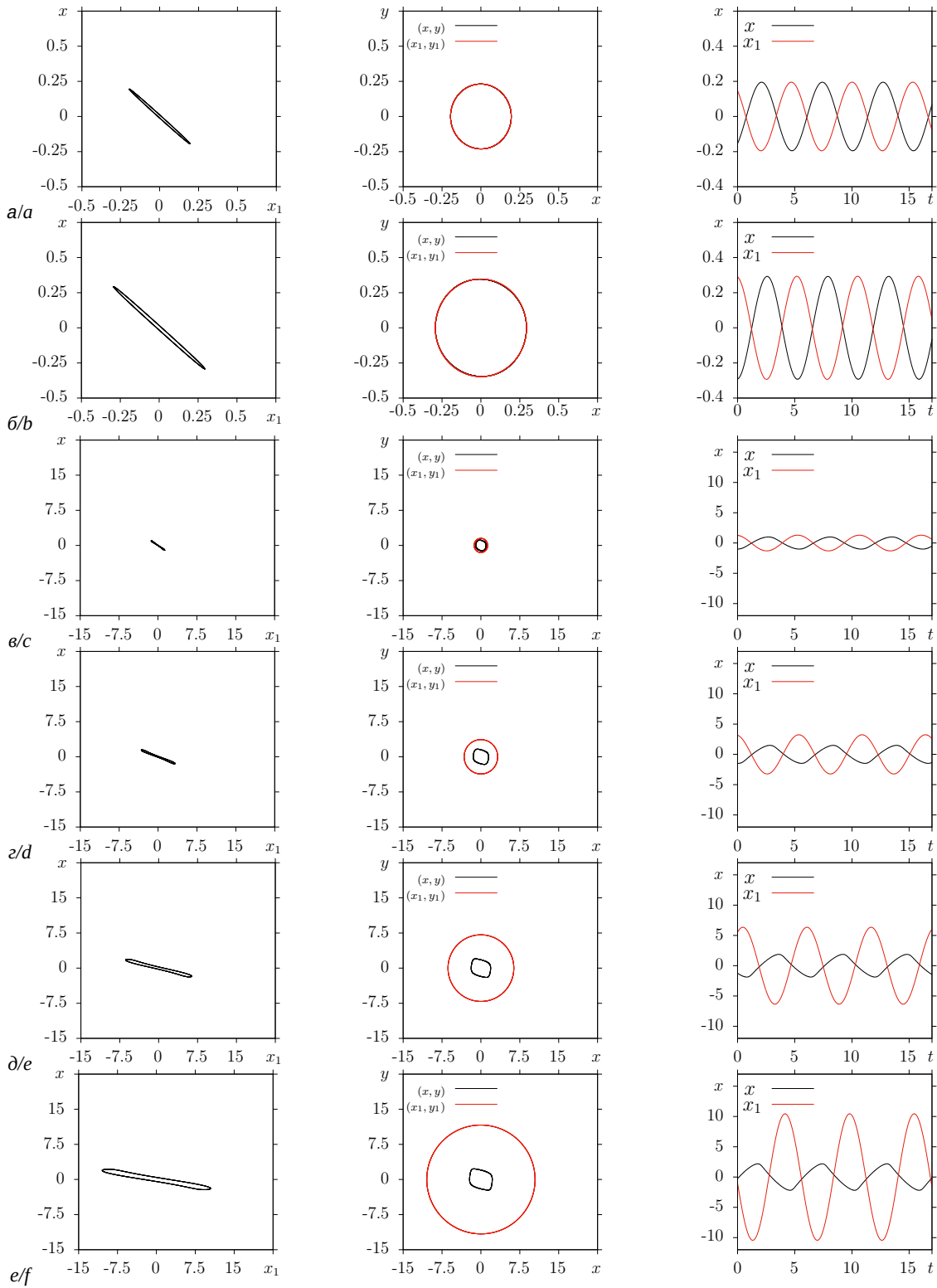


Рис. 5. Проекция фазовых портретов (левый и средний столбцы) и временные реализации (правый столбец) автоколебательных режимов, возникших на базе противофазного цикла C_2 в основном (черные кривые) и дополнительном (красные кривые) контурах, при фиксированном $p = 1.0$ и различных значениях параметра возбуждения ϵ : 0.05 (а), 0.1 (б), 1.0 (в), 2.0 (г), 3.0 (д), 4.0 (е) (цвет онлайн)

Fig. 5. Projections of phase portraits (left and middle columns) and time series (right column) of self-sustained oscillatory regimes appeared on the base of anti-phase cycle C_2 in the main (black curves) and additional (red curves) circuits for the fixed value of $p = 1.0$ and different values of the excitation parameter ϵ : 0.05 (a), 0.1 (b), 1.0 (c), 2.0 (d), 3.0 (e), 4.0 (f) (color online)

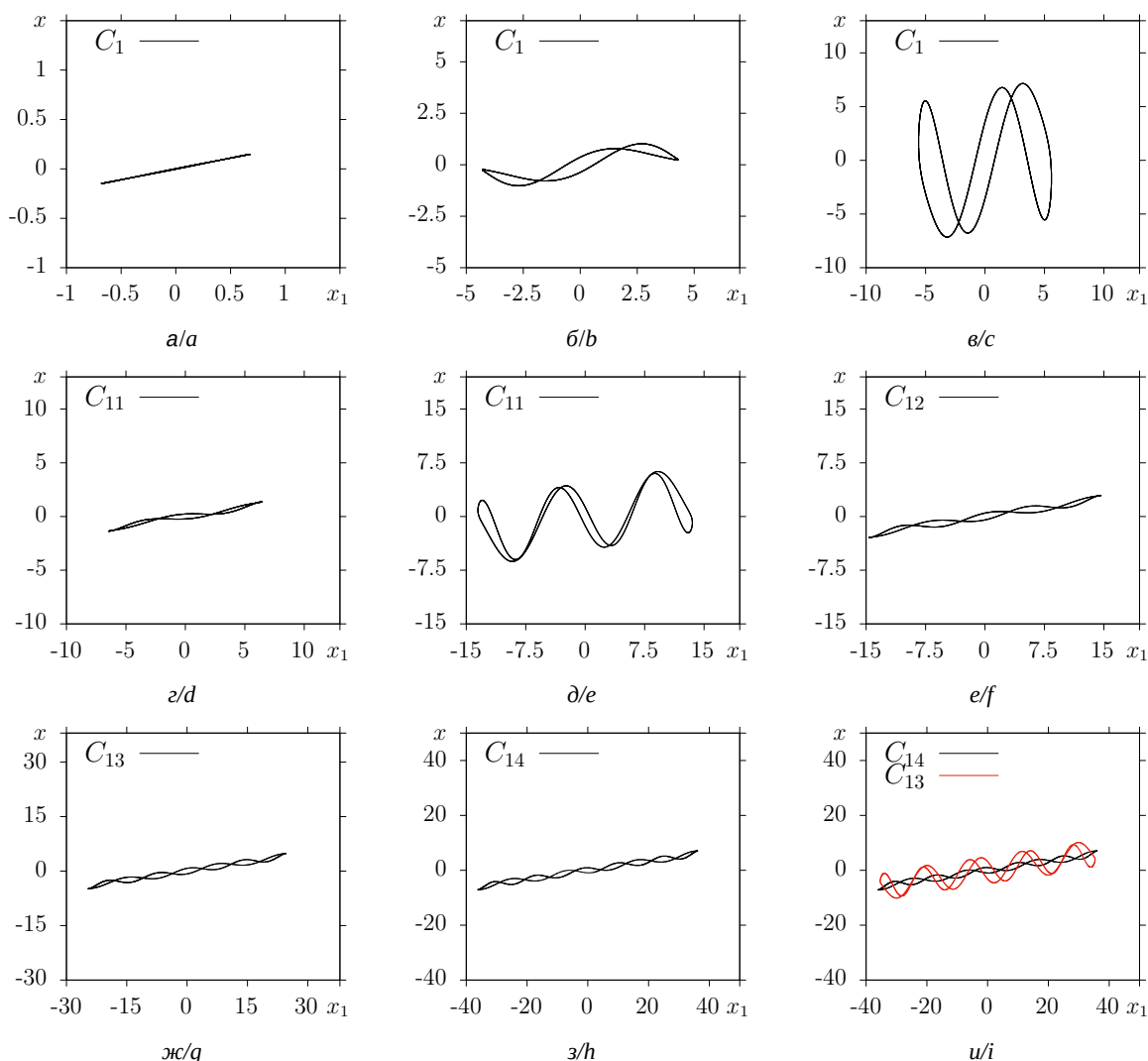


Рис. 6. Проекция (x_1, x) предельных циклов, возникших на базе синфазного цикла C_1 при фиксированном значении расстройки $p = 0.5$ и различных значениях параметра возбуждения ϵ : 0.1 (а), 1.6 (б), 2.31 (в) – цикл C_1 ; 2.32 (г), 4.35 (д) – цикл C_{11} ; 4.48 (е) – цикл C_{12} ; 6.58 (ж) – цикл C_{13} ; 8.67 (з) – цикл C_{14} ; 8.65 (и) – сосуществующие предельные циклы C_{13} (черная кривая) и C_{14} (красная кривая), образующие одну из областей бистабильности (см. рис. 4, б) (цвет онлайн)

Fig. 6. Projections (x_1, x) of the limit cycles arisen on the base of in-phase cycle C_1 for the fixed value of frequency detuning $p = 0.5$ and different values of the excitation parameter ϵ : 0.1 (a), 1.6 (b), 2.31 (c) – cycle C_1 ; 2.32 (d), 4.35 (e) – cycle C_{11} ; 4.48 (f) – cycle C_{12} ; 6.58 (g) – cycle C_{13} ; 8.67 (h) – cycle C_{14} ; 8.65 (i) – coexisting limit cycles C_{13} (black curve) and C_{14} (red curve) which form one of the bistability regions (Fig. 4, b) (color online)

обратном движении по параметру наблюдается гистерезис. Предельный цикл C_{11} существует до $\epsilon = 1.98$. При этом значении наблюдается жесткий переход обратно на предельный цикл C_1 . В области гистерезиса сосуществуют устойчивые циклы C_{11} и C_1 . Проследим за предельным циклом C_{11} с увеличением параметра возбуждения от $\epsilon = 2.32$. С ростом ϵ форма C_{11} плавно трансформируется. При $\epsilon = 4.35$ он имеет вид, представленный на рис. 6, д. При $\epsilon = 4.48$ происходит жесткий переход на другой предельный цикл, который обозначим C_{12} . Проекция этого

предельного цикла представлена на рис. 6, е. При обратном движении по параметру перескок с C_{12} на C_{11} происходит при $\epsilon = 4.24$. Бистабильные состояния C_{11} и C_{12} сосуществуют в интервале значений ϵ от 4.24 до 4.48. Далее цикл C_{12} претерпевает бифуркацию при $\epsilon = 6.58$, происходит жесткий переход на C_{13} (рис. 6, ж). Устойчивые предельные циклы C_{12} и C_{13} сосуществуют в интервале значений ϵ от 6.42 до 6.58. При $\epsilon = 6.42$ происходит жесткий переход с цикла C_{13} на C_{12} . С увеличением ϵ цикл C_{13} претерпевает бифуркацию при $\epsilon = 8.67$, происходит жесткий переход



на цикл C_{14} (рис. 6, з). Интервал бистабильности для этих предельных циклов ограничен значениями $\epsilon = 8.53$ и $\epsilon = 8.67$. На рис. 6, и показаны проекции двух сосуществующих устойчивых предельных циклов C_{13} и C_{14} при $\epsilon = 8.65$. Далее по параметру возбуждения до $\epsilon = 10$ предельный цикл C_{14} никаких бифуркаций не демонстрирует.

Перечисленные предельные циклы и их бифуркации формируют структуру плоскости параметров (p, ϵ) на базе предельного цикла C_1 при $p < 1$ (см. рис. 4, б). Здесь показаны «полосы бистабильности», ограниченные линиями складок для попарно сосуществующих устойчивых предельных циклов C_1 и C_{11} , C_{11} и C_{12} , C_{12} и C_{13} , C_{13} и C_{14} соответственно, по мере перемещения от одной «полосы бистабильности» к другой от центра влево. Кроме рассмотренных предельных циклов и соответствующих областей бистабильности, на плоскости параметров на рис. 4, б показаны еще линии складок, ограничивающие области бистабильности для C_{14} и C_{15} , C_{15} и C_{16} , C_{16} и C_{17} .

Для более детальной иллюстрации наблюдаемых бистабильных состояний на рис. 7 показаны проекции предельных циклов и временные реализации семейства автоколебательных режимов, возникшего на базе C_1 , при фиксированном значении параметра расстройки по частоте $p = 0.5$ и различных значениях ϵ . При слабом возбуждении $\epsilon = 0.1$ наблюдаются квазигармонические автоколебания (рис. 7, а), причем амплитуда колебаний в дополнительном контуре значительно меньше, чем в генераторе Рэлея. С ростом ϵ , еще до бифуркации, колебания становятся ангармоническими (рис. 7, б). В генераторе они превращаются в релаксационные пилообразной формы, а в дополнительном контуре во временной реализации на периоде колебаний появляются осцилляции, что приводит к появлению петель на проекциях предельного цикла. Такая ангармоничность в дополнительном контуре с увеличением параметра развивается постепенно. Вначале мягко возникают осцилляции малой интенсивности, затем они нарастают и достигают максимальной величины вблизи точки бифуркации. Здесь интенсивность колебаний больше, чем в генераторе Рэлея (рис. 7, в). При переходе через точку бифуркации происходит жесткий переход на другой устойчивый предельный цикл C_{11} (рис. 7, г). С увеличением параметра этот цикл развивается аналогичным образом (рис. 7, д), как и предыдущий. Далее происходит жесткий переход на предельный цикл C_{12}

(рис. 7, е) и т. д. Предельные циклы, формирующие «полосы бистабильности», отличаются друг от друга количеством петель, что обусловлено разным числом осцилляций на периоде в дополнительном контуре.

Заключение

Рассмотрена автоколебательная система с двумя степенями свободы, состоящая из осциллятора Рэлея, взаимодействующего с линейным диссипативным осциллятором, которая полностью тождественна классической системе генератора Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром [20]. Для этой системы характерно явление затягивания частоты, обусловленное гистерезисом и бистабильностью [21]. В работе [22] для генератора Ван дер Поля с дополнительным колебательным контуром был выявлен бифуркационный механизм формирования мультистабильности в случае малых значений параметра возбуждения, когда автоколебательная система является квазигармонической. В данной работе авторы расширили исследование явления затягивания частоты и бистабильности, изучив влияние ангармоничности на мультистабильность в автоколебательной системе с двумя степенями свободы, описываемой связанными уравнениями Рэлея и линейного диссипативного осциллятора.

Исследование показало, что классическое явление затягивания частоты наблюдается только при небольших значениях параметра возбуждения ϵ . Область бистабильности, где сосуществуют два предельных цикла, соответствующие синфазным и противофазным режимам колебаний в связанных осцилляторах, ограничена не только по параметру расстройки p , но и по ϵ . По мере увеличения параметра возбуждения и развития ангармоничности, когда квазигармонические автоколебания превращаются в релаксационные пилообразной формы, одно из бистабильных состояний (C_2) теряет устойчивость и явление затягивания частоты больше не наблюдается. При больших значениях параметра возбуждения и определенных расстройках по частоте на базе синфазного семейства циклов наблюдаются разнообразные бифуркации, приводящие к новым режимам. Формируются новые мультистабильные состояния. На плоскости параметров при $p < 1$ возникает ряд «полос бистабильности», ограниченных линиями складок для попарно сосуществующих устойчивых

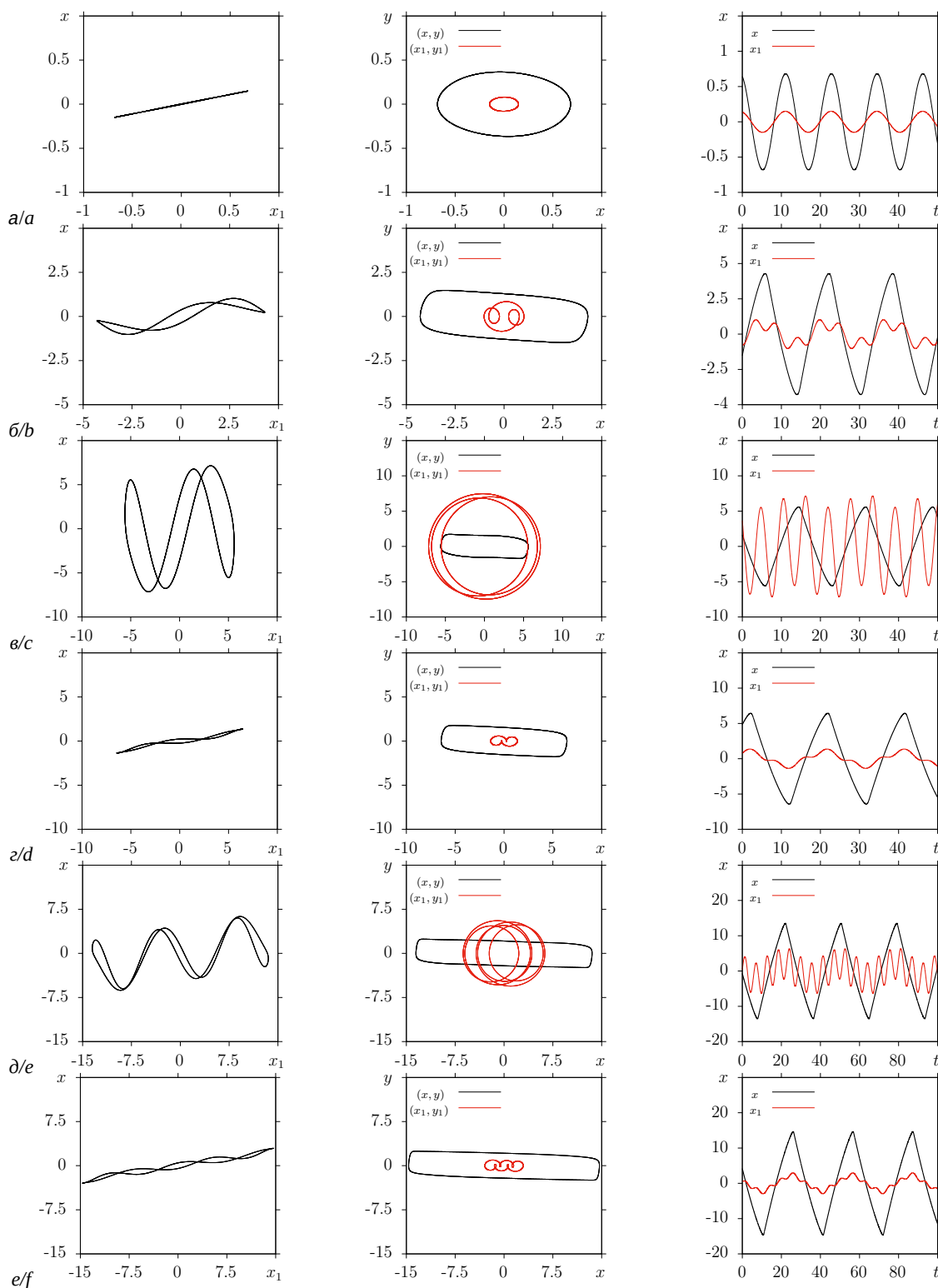


Рис. 7. Проекция предельных циклов (левый и средний столбцы) и временные реализации (правый столбец) семейства колебательных режимов, возникшего на базе цикла C_1 в основном (черные кривые) и дополнительном (красные кривые) контурах, при фиксированном параметре расстройки $p = 0.5$ и различных значениях параметра возбуждения ε : 0.1 (а), 1.6 (б), 2.31 (в), 2.32 (г), 4.35 (д), 4.48 (е) (цвет онлайн)

Fig. 7. Projections of limit cycles (left and middle columns) and time series (right column) of self-sustained oscillatory regimes appeared on the base of in-phase cycle C_1 in the main (black curves) and additional (red curves) circuits for the fixed value of $p = 0.5$ and different values of the excitation parameter ε : 0.1 (a), 1.6 (b), 2.31 (c), 2.32 (d), 4.35 (e), 4.48 (f) (color online)



предельных циклов. При малых значениях параметра возбуждения появление мультистабильности определяется двумя последовательными суперкритическими бифуркациями Андронова–Хопфа состояния равновесия и субкритической бифуркацией Неймарка–Сакера седлового предельного цикла. При больших значениях параметра возбуждения мультистабильность возникает через седло–узловые бифуркации рождения пар устойчивого и неустойчивого предельных циклов. Здесь можно предположить, что механизм формирования мультистабильности через последовательность суперкритических бифуркаций Андронова–Хопфа и субкритических бифуркаций Неймарка–Сакера более характерен для квазивигармонических автоколебательных систем.

В заключение следует отметить, что явления, исследуемые в данной работе, имеют практическое значение. Помимо хорошо известного давно используемого метода стабилизации частоты автоколебаний, в основе которого лежит явление затягивания, недавно было предложено использовать явления, возникающие в генераторе с дополнительным контуром, при создании центральных генераторов ритма [29].

Список литературы

1. Pisarchik A. N., Hramov A. E. Multistability in Physical and Living Systems. Switzerland : Springer, 2022. 408 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98396-3>
2. Pisarchik A. N., Feudel U. Control of multistability // Phys. Rep. 2014. Vol. 540. P. 167–218. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.02.007>
3. Leonov G. A., Kuznetsov N. V. Hidden attractors in dynamical systems. From hidden oscillations in Hilbert–Kolmogorov, Aizerman, and Kalman problems to hidden chaotic attractor in Chua’s circuits // Int. J. of Bifur. and Chaos. 2013. Vol. 23, no. 1. Article number 1330002. <https://doi.org/10.1142/S0218127413300024>
4. Dudkowski D., Jafari S., Kapitaniak T., Kuznetsov N. V., Leonov G. A., Prasad A. Hidden attractors in dynamical systems // Phys. Rep. 2016. Vol. 637. P. 1–50. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.05.002>
5. Hossain M., Garai S., Jafari S., Pal N. Bifurcation, chaos, multistability, and organized structures in a predator–prey model with vigilance // Chaos. 2022. Vol. 32. Article number 063139. <https://doi.org/10.1063/5.0086906>
6. Manchein C., Santana L., da Silva R. M., Beims M. W. Noise-induced stabilization of the FitzHugh–Nagumo neuron dynamics: Multistability and transient chaos // Chaos. 2022. Vol. 32. Article number 083102. <https://doi.org/10.1063/5.0086994>
7. Meucci R., Ginoux J. M., Mehrabbeik M., Jafari S., Sprott J. L. Generalized multistability and its control in a laser // Chaos. 2022. Vol. 32. Article number 083111. <https://doi.org/10.1063/5.0093727>
8. Bao H., Zhang J., Wang N., Kuznetsov N. V., Bao B. C. Adaptive synapse-based neuron model with heterogeneous multistability and riddled basins // Chaos. 2022. Vol. 32. Article number 123101. <https://doi.org/10.1063/5.0125611>
9. Skardal P. S., Adhikari S., Restrepo J. G. Multistability in coupled oscillator systems with higher-order interactions and community structure // Chaos. 2023. Vol. 33. Article number 023140. <https://doi.org/10.1063/5.0106906>
10. Perks J., Valani R. N. Dynamics, interference effects, and multistability in a Lorenz-like system of a classical wave–particle entity in a periodic potential // Chaos. 2023. Vol. 33. Article number 033147. <https://doi.org/10.1063/5.0125727>
11. Dogonasheva O., Kasatkin D., Gutkin B., Zakharov D. Multistability and evolution of chimera states in a network of type II Morris–Lecar neurons with asymmetrical nonlocal inhibitory connections // Chaos. 2022. Vol. 32. Article number 101101. <https://doi.org/10.1063/5.0117845>
12. Sathiyadevi K., Premraj D., Banerjee T., Lakshmanan M. Additional complex conjugate feedback-induced explosive death and multistabilities // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106. Article number 024215. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.024215>
13. Mugnaine M., Sales M. R., Szezech J. D., Viana Jr. R. L. Dynamics, multistability, and crisis analysis of a sine-circle nontwist map // Phys. Rev. E. 2022. Vol. 106. Article number 034203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.034203>
14. Foss J., Longtin A., Mensour B., Milton J. Multistability and Delayed Recurrent Loops // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76, no. 4. P. 708–711. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.708>
15. Baer T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-laser pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers // J. Opt. Soc. Am. B. 1986. Vol. 3. P. 1175–1180. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.3.001175>
16. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М. : Мир, 1985. 254 с.
17. Kuznetsov Yu. A. Elements of Applied Bifurcation Theory. New York : Springer-Verlag, 1998. 591 p.
18. Астахов В. В., Безручко Б. П., Гуляев Ю. В., Селезнев Е. П. Мультистабильные состояния диссипативно связанных фейгенбаумовских систем // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, вып. 3. С. 60–65.
19. Astakhov V., Shabunin A., Uhm W., Kim S. Multistability formation and synchronization loss in coupled Henon maps: Two sides of the single bifurcational mechanism // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 63. Article number 056212. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.056212>
20. Van der Pol B. On Oscillation Hysteresis in a Triode Generator with Two Degrees of Freedom // Philosophical Magazine and Journal of Science. 1922. Ser. 6. P. 700–719.
21. Андронов А. А., Витт А. А. К математической теории автоколебательных систем с двумя степенями свободы // Журнал технической физики. 1934. Т. 4, вып. 1. С. 122.



22. Astakhov S., Astakhov O., Astakhov V., Kurths J. Bifurcational Mechanism of Multistability Formation and Frequency Entrainment in a van der Pol Oscillator with an Additional Oscillatory Circuit // *Int. J. of Bifur. and Chaos*. 2016. Vol. 26, no. 7. Article number 1650124-1–1650124-10. <https://doi.org/10.1142/S0218127416501248>
23. Astakhov O. V., Astakhov S. V., Krakhovskaya N. S., Astakhov V. V., Kurths J. The emergence of multistability and chaos in a two-mode van der Pol generator versus different connection types of linear oscillators // *Chaos*. 2018. Vol. 28. Article number 063118. <https://doi.org/10.1063/1.5002609>
24. Ermentrout B. *Simulating, Analyzing, and Animating Dynamical Systems: A Guide to XPPAUT for Researchers and Students*. Philadelphia : SIAM, 2002. 290 p.
25. Стрэтт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука : в 2 т. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. Т. 1. 504 с.
26. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 916 с.
27. Ланда П. С. Нелинейные колебания и волны. М. : Наука. Физматлит, 1997. 496 с.
28. Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М. Нелинейные колебания. М. : Издательство физико-математической литературы, 2002. 292 с.
29. Kurkin S. A., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Astakhov S. V., Hramov A. E. Central pattern generator based on self-sustained oscillator coupled to a chain of oscillatory circuits // *Chaos*. 2022. Vol. 32. Article number 033117. <https://doi.org/10.1063/5.0077789>
7. Meucci R., Ginoux J. M., Mehrabbeik M., Jafari S., Sprott J. L. Generalized multistability and its control in a laser. *Chaos*, 2022, vol. 32, article no. 083111. <https://doi.org/10.1063/5.0093727>
8. Bao H., Zhang J., Wang N., Kuznetsov N. V., Bao B. C. Adaptive synapse-based neuron model with heterogeneous multistability and riddled basins. *Chaos*, 2022, vol. 32, article no. 123101. <https://doi.org/10.1063/5.0125611>
9. Skardal P. S., Adhikari S., Restrepo J. G. Multistability in coupled oscillator systems with higher-order interactions and community structure. *Chaos*, 2023, vol. 33, article no. 023140. <https://doi.org/10.1063/5.0106906>
10. Perks J., Valani R. N. Dynamics, interference effects, and multistability in a Lorenz-like system of a classical wave–particle entity in a periodic potential. *Chaos*, 2023, vol. 33, article no. 033147. <https://doi.org/10.1063/5.0125727>
11. Dogonasheva O., Kasatkin D., Gutkin B., Zakharov D. Multistability and evolution of chimera states in a network of type II Morris–Lecar neurons with asymmetrical non-local inhibitory connections. *Chaos*, 2022, vol. 32, article no. 101101. <https://doi.org/10.1063/5.0117845>
12. Sathiyadevi K., Premraj D., Banerjee T., Lakshmanan M. Additional complex conjugate feedback-induced explosive death and multistabilities. *Phys. Rev. E*, 2022, vol. 106, article no. 024215. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.024215>
13. Mugnaine M., Sales M. R., Szezech J. D., Viana Jr. R. L. Dynamics, multistability, and crisis analysis of a sine-circle nontwist map. *Phys. Rev. E*, 2022, vol. 106, article no. 034203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.034203>
14. Foss J., Longtin A., Mensour B., Milton J. Multistability and Delayed Recurrent Loops. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, vol. 76, no. 4, pp. 708–711. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.708>
15. Baer T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-laser pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, vol. 3, pp. 1175–1180. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.3.001175>
16. Thompson J. M. T. *Neustoichivosti i katastrofy v nauke i tekhnike* [Instabilities and catastrophes in science and technology]. Moscow, Mir, 1985. 254 p. (in Russian).
17. Kuznetsov Yu. A. *Elements of Applied Bifurcation Theory*. New York, Springer-Verlag, 1998. 591 p.
18. Astakhov V. V., Bezruchko B. P., Gulyaev Y. V. Multistable states in dissipatively coupled Feigenbaum systems. *Tech. Phys. Lett.*, 1989, vol. 15, iss. 3, pp. 60–65 (in Russian).
19. Astakhov V., Shabunin A., Uhm W., Kim S. Multistability formation and synchronization loss in coupled Henon maps: Two sides of the single bifurcational mechanism. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 63, article no. 056212. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.056212>
20. Van der Pol B. On Oscillation Hysteresis in a Triode Generator with Two Degrees of Freedom. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1922, ser. 6, pp. 700–719.



21. Andronov A. A., Vitt A. A. To the mathematical theory of self-sustained oscillatory systems with two degrees of freedom. *J. of Technical Physics*, 1934, vol. 4, iss. 1, pp. 122 (in Russian).
22. Astakhov S., Astakhov O., Astakhov V., Kurths J. Bifurcational Mechanism of Multistability Formation and Frequency Entrainment in a van der Pol Oscillator with an Additional Oscillatory Circuit. *Int. J. of Bifur. and Chaos*, 2016, vol. 26, no. 7, article no. 1650124-1–1650124-10. <https://doi.org/10.1142/S0218127416501248>
23. Astakhov O. V., Astakhov S. V., Krakhovskaya N. S., Astakhov V. V., Kurths J. The emergence of multistability and chaos in a two-mode van der Pol generator versus different connection types of linear oscillators. *Chaos*, 2018, vol. 28, article no. 063118. <https://doi.org/10.1063/1.5002609>
24. Ermentrout B. *Simulating, Analyzing, and Animating Dynamical Systems: A Guide to XPPAUT for Researchers and Students*. Philadelphia, SIAM, 2002. 290 p.
25. Strett J. B. (Lord Rayleigh). *Teoriya zvuka: v 2 t. T. 1* [Theory of sound. Vol. 1]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoi literatury, 1955. 504 p. (in Russian).
26. Andronov A. A., Vitt A. A., Khaikin S. E. *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1959. 916 p. (in Russian).
27. Landa P. S. *Nelineinye kolebaniya i volny* [Nonlinear oscillations and waves]. Moscow, Fizmatlit, 1997. 496 p. (in Russian).
28. Kuznetsov A. P., Kuznetsov S. P., Ryskin N. M. *Nelineinye kolebaniya* [Nonlinear oscillations]. Moscow, Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2002. 292 p. (in Russian).
29. Kurkin S. A., Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Astakhov S. V., Hramov A. E. Central pattern generator based on self-sustained oscillator coupled to a chain of oscillatory circuits. *Chaos*, 2022, vol. 32, article no. 033117. <https://doi.org/10.1063/5.0077789>

Поступила в редакцию 24.09.2023; одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 15.12.2023
The article was submitted 24.09.2023; approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 15.12.2023



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 19–29
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 19–29
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>, EDN: UFAMDM

Научная статья
УДК 530.182:537.86

Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения КОГНИТИВНЫХ ЗАДАЧ

А. В. Курбако^{1,2,3}✉, А. Н. Храмов^{1,3}, Е. И. Боровкова^{1,3}, Е. С. Дубинкина^{1,3},
Ю. М. Ишбулатов^{1,3}, В. И. Пономаренко^{2,3}, А. С. Караваев^{1,2,3}, М. Д. Прохоров^{2,3}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

³Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия, 236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, д. 14

Курбако Александр Васильевич, ¹ ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, ² младший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, kurbako.sasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3479-4609>, AuthorID: 1055278

Храмов Алексей Николаевич, ассистент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, anhramkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0730-6024>, AuthorID: 1055072

Боровкова Екатерина Игоревна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, rubanei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1429-3599>, AuthorID: 682183

Дубинкина Елизавета Сергеевна, лаборант кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, komet.ed@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4636-3937>, AuthorID: 1204137

Ишбулатов Юрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

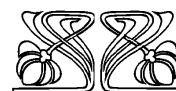
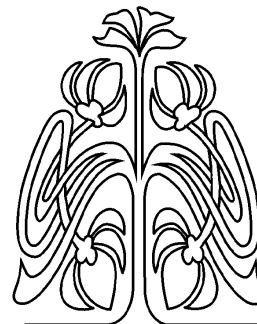
Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹ профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии; ² ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, ¹ заведующий кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии; ² старший научный сотрудник лаборатории моделирования в нелинейной динамике, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

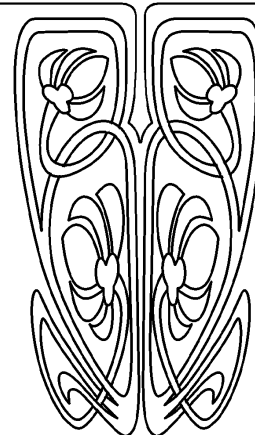
Прохоров Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, ² заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Аннотация. Разработан аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения когнитивных задач по сигналам электроэнцефалограммы (ЭЭГ). Проведено сопоставление диагностической способности разработанного комплекса с сертифицированным серийным прибором. Установлены отведения ЭЭГ, позволяющие диагностировать изменение психофизиологического состояния человека на основе анализа изменения спектральной плотности мощности сверхмедленных колебаний

© Курбако А. В., Храмов А. Н., Боровкова Е. И., Дубинкина Е. С.,
Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Караваев А. С.,
Прохоров М. Д., 2024



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





(с частотой менее 0.4 Гц) потенциала одноканальной ЭЭГ. Показано, что созданный аппаратно-программный комплекс позволяет диагностировать изменение психофизиологического состояния человека после выполнения им стандартных тестов с дозированной ментальной нагрузкой.

Ключевые слова: психофизиологическое состояние, электроэнцефалограмма, спектральная мощность, аппаратно-программный комплекс

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российской федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030» в Балтийском федеральном университете имени Иммануила Канта.

Для цитирования: Курбако А. В., Храмов А. Н., Боровкова Е. И., Дубинкина Е. С., Ишбулатов Ю. М., Пономаренко В. И., Карavaев А. С., Прохоров М. Д. Аппаратно-программный комплекс для диагностики психофизиологического состояния человека в процессе решения когнитивных задач // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 19–29. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>, EDN: UFAMDM

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Hardware-software complex for diagnostics of a human psychophysiological state during the solving of cognitive tasks

A. V. Kurbako^{1,2,3}✉, A. N. Hramkov^{1,3}, E. I. Borovkova^{1,3}, E. S. Dubinkina^{1,3}, Y. M. Ishbulatov^{1,3}, V. I. Ponomarenko^{2,3}, A. S. Karavaev^{1,2,3}, M. D. Prokhorov^{2,3}

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Saratov Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

³Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo St., Kaliningrad 236041, Russia

Aleksandr V. Kurbako, kurbako.sasha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3479-4609>, AuthorID: 1055278

Aleksey N. Hramkov, anhrmkov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0730-6024>, AuthorID: 1055072

Ekaterina I. Borovkova, rubanei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1429-3599>, AuthorID: 682183

Elizaveta S. Dubinkina, kometa.ed@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4636-3937>, AuthorID: 1204137

Yurii M. Ishbulatov, ishbulatov95@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2871-5465>, AuthorID: 829775

Vladimir I. Ponomarenko, ponomarenkovi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1579-6465>, AuthorID: 39986

Anatoly S. Karavaev, karavaevas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4678-3648>, AuthorID: 128455

Mikhail D. Prokhorov, mdprokhorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4069-9410>, AuthorID: 39985

Abstract. Background and Objectives: Psychological state of a person can change under conditions of cognitive load. Excessive cognitive load can lead to distress, which reduces performance. Diagnosis of changes in the psychophysical state in the process of performing cognitive tasks is important for human health and increasing the efficiency of his work. Therefore, the purpose of the study is to develop a hardware and software complex for diagnosing the psychophysiological state of a person in the process of solving cognitive problems. **Materials and Methods:** Electroencephalogram signals were recorded using a developed device and a certified standard recorder during a biological experiment. A comparison was made of the diagnostic capabilities of the developed hardware-software complex and a serial device. **Results:** A hardware-software complex has been developed for diagnosing the psychophysiological state of a person in the process of solving cognitive problems using an electroencephalogram signal. The developed system has shown sensitivity and specificity values close to those of the serial recorder. Using the developed complex, the electroencephalogram channels suitable for diagnosing the psychophysical state have been selected. **Conclusion:** The developed hardware-software complex can be used to diagnose the psychophysiological state of a person in the process of performing cognitive tasks.

Keywords: psychophysical state, electroencephalogram, spectral power, hardware-software complex

Acknowledgements: This research was supported from the Russian Federal Academic Leadership Program “Priority 2030” at the Immanuel Kant Baltic Federal University.

For citation: Kurbako A. V., Hramkov A. N., Borovkova E. I., Dubinkina E. S., Ishbulatov Y. M., Ponomarenko V. I., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Hardware-software complex for diagnostics of a human psychophysiological state during the solving of cognitive tasks. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 19–29 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-19-29>, EDN: UFAMDM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Психофизиологическое состояние человека может изменяться в условиях когнитивной нагрузки [1, 2]. При умеренной когнитивной нагрузке развивается состояние эустресса, повышающее физическую и ментальную работоспособность и сопровождающееся безопасными для человека функциональными физиологическими

изменениями [3]. Однако повышенная интенсивность и чрезмерная длительность нагрузки могут привести к развитию дистресса – опасного для здоровья синдрома, снижающего работоспособность [3]. Поэтому диагностика изменения психофизиологического состояния в процессе выполнения когнитивных задач имеет важное значение для здоровья человека и повышения эффективности его труда.



Известно, что изменение психофизиологического состояния и развитие стресса сопровождаются комплексом физиологических реакций – сложными нелинейными изменениями: гормонального фона, частоты сердечных сокращений, артериального давления, биопотенциалов человеческого тела, проводимости кожи, характера движения зрачков и др. [4–8].

Известны десятки методов диагностики стресса, основанные на анализе биологических сигналов: электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [9], электромиограммы [10], электрокардиограммы [11], артериального давления [12], электродерматограммы [13] и других сигналов. Однако известные инструментальные методы диагностики либо противоречивы, либо требуют использования стационарного дорогостоящего оборудования и особых условий проведения исследования (например, анализа уровня гормонов) [4–8]. Таким образом, разработка аппаратно-программного комплекса для диагностики изменения психофизиологического состояния человека в повседневных бытовых условиях жизнедеятельности остается важной и актуальной нерешенной научной задачей.

Поэтому целью данной работы является разработка методики анализа сигналов ЭЭГ и реализация её в виде аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего количественную диагностику изменения психофизиологического состояния человека в процессе решения им когнитивных задач.

Методы

В работе [14] была показана возможность диагностики психофизиологического состояния человека по изменению спектральной мощности сверхмедленных колебаний потенциала (СМКП) ЭЭГ в частотных диапазонах δ_1 (от 0.05 до 0.15 Гц) и δ_2 (от 0.15 до 0.5 Гц). Было показано, что в обоих диапазонах суммарная спектральная мощность колебаний в ЭЭГ в состоянии стресса, вызванном дозированной когнитивной нагрузкой, была значимо ниже, чем в состоянии покоя. Влияние стресса на изменение свойств динамики сверхмедленных колебаний потенциала ЭЭГ обусловлено, с одной стороны, его известным влиянием на процессы вегетативной регуляции организма [14–16], а с другой стороны, связано с проекцией активности центров вегетативной регуляции головного мозга на СМКП ЭЭГ [17–22].

В данной работе предлагается методика диагностики психофизиологического состояния человека, основанная на контроле интегральной спектральной плотности мощности СМКП одноканальной ЭЭГ в частотном диапазоне 0.05–0.4 Гц. Зарегистрированный сигнал ЭЭГ фильтровался с помощью цифрового полосового фильтра Баттерверта 4-го порядка с вышеуказанной полосой пропускания. Оценивалась суммарная спектральная мощность фильтрованного сигнала в окне шириной 360 с, равном длительности одного этапа эксперимента. В соответствии с работой [14] методика диагностировала когнитивный стресс, если величина интегральной спектральной плотности мощности, оцененная в окне, была меньше чем интегральная спектральная плотность мощности, оцененная в предыдущем окне, соответствующем состоянию покоя.

Экспериментальные данные

Проверка работоспособности предложенного метода осуществлялась в ходе анализа экспериментальных данных. Дизайн эксперимента включал несколько этапов (рис. 1): 10-минутная стабилизация, во время которой запись не осуществлялась; 6 мин – фоновая запись (R0); 6 мин – когнитивная нагрузка (S0); 6 мин – отдых (R1); 6 мин – когнитивная нагрузка (S1); 6 мин – этап восстановления (R2) [23]. Длительность эксперимента составляла, таким образом, 40 мин, длительность записей – 30 мин. Для вызова стресса использовались хорошо зарекомендовавшие себя методы: цветовой тест Струпа (S0) [24] и ментальный арифметический тест (S1) [25].

В ходе теста Струпа (этап S0) доброволец произносил про себя цвет, в который было окрашено слово, обозначающее другой цвет. Визуальные стимулы сменялись с периодом одна секунда. В ходе ментального арифметического теста (этап S1) добровольцу предъявлялось трехзначное число. Ставилась задача сложения в уме цифр этого числа. Если в результате сложения получалось двузначное число, то требовалось сложить его цифры и определить четность полученного однозначного числа. Стимулы предъявлялись каждые 5 с.

В ходе исследований регистрировались сигналы ЭЭГ с 8 униполярных отведений: F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, установленных в соответствии с монтажной схемой 8–3. Регистрация

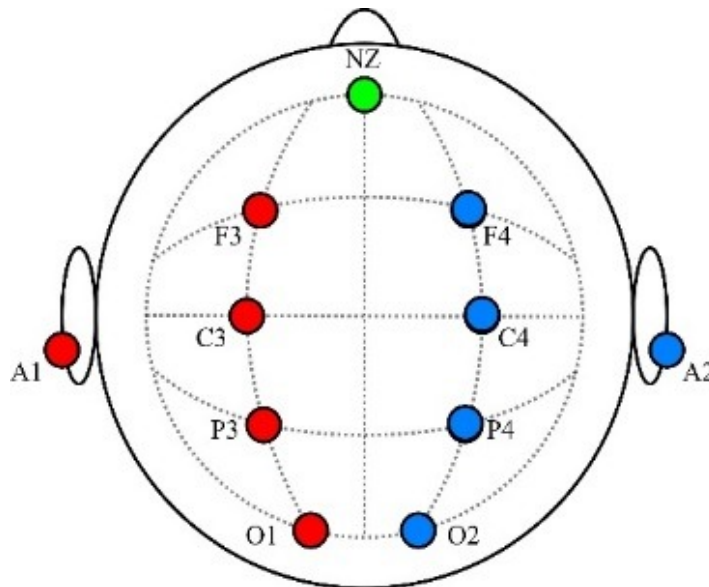
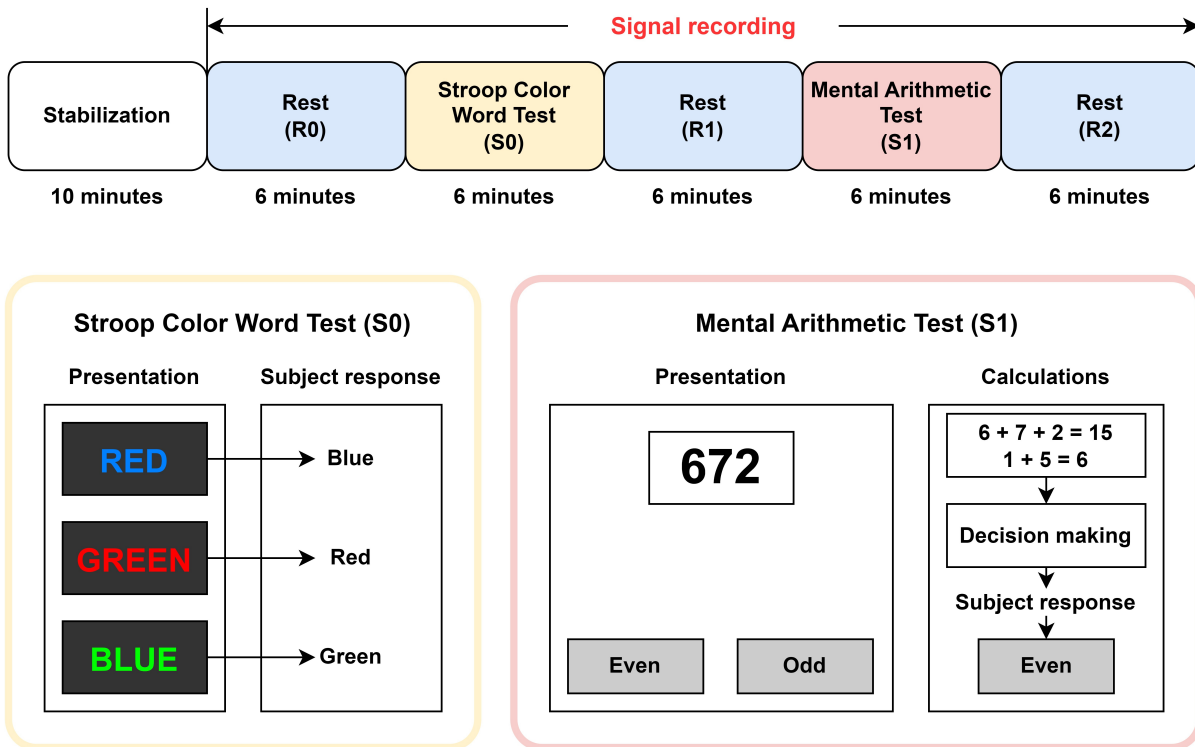


Рис. 1. Дизайн экспериментального исследования. R0, R1, R2 – участки без когнитивного стресса, S0, S1 – участки когнитивного стресса (цвет онлайн)

Fig. 1. Experimental study design. R0, R1, R2 – areas without cognitive stress, S0, S1 – areas of cognitive stress (color online)

сигналов ЭЭГ осуществлялась одновременно серийным сертифицированным устройством «Медиком Энцефалан-ЭЭГР-19/26» [26] и устройством, разработанным авторами статьи. Электроды соответствующих отведений двух устройств размещались на скальпе в непосредственной близости друг к другу. Были зарегистрированы экспериментальные сигналы 6 здоровых добро-

вольцев – мужчин в возрасте 25.0 ± 3.2 года (среднее \pm стандартное отклонение). Для регистрации обоими устройствами использовались идентичные наборы сертифицированных электродов Медиком.

Все добровольцы были проинформированы о цели и дизайне исследования перед его началом.



Аппаратный блок

В ходе работы был разработан и изготовлен аппаратный модуль, используемый для регистрации и предварительной обработки экспериментальных данных. Схема электрическая принципиальная разработанного устройства представлена на рис. 2.

Основными элементами схемы являются frontend-микросхема U6, включающая схему мультиплексирования входов, входные усилители с программируемым усилением,

восемь аналого-цифровых преобразователей, программируемые цифровые фильтры и вспомогательные аналоговые и конфигурируемые цифровые элементы. Конфигурацию U6, управление этой микросхемой, получение от нее данных по протоколу Serial Peripheral Interface осуществляет микроконтроллер U1, тактируемый кварцевым резонатором X1 частотой 8 МГц.

Питание цифровых элементов устройства (VCCU1, DVDDU6) осуществляется настраиваемым линейным стабилизатором U3, обеспечива-

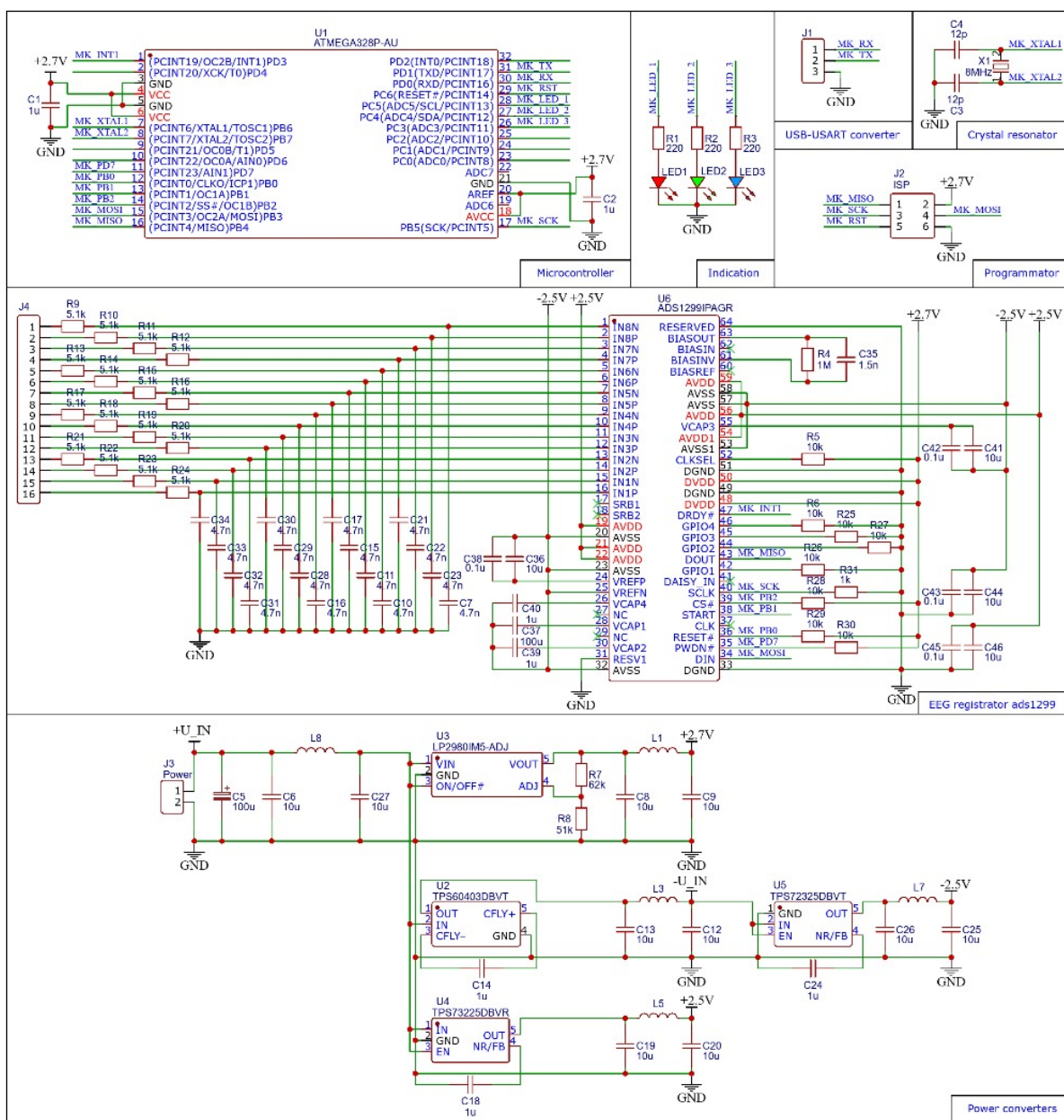


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема разработанного 8-канального цифрового регистратора сигналов ЭЭГ (цвет онлайн)

Fig. 2. Electrical circuit of the developed 8-channel digital EEG signal recorder (color online)



ющим выходное напряжение 2.7 В, что позволяет питать устройство одной ячейкой литий-полимерного аккумулятора (напряжение 3.0–4.2 В).

Питание аналоговых элементов U6 биполярное: от –2.5 до +2.5 В. Положительное аналоговое питание обеспечивается стабилизатором U4, а отрицательное – инвертором напряжения U2 и линейным стабилизатором U5.

Конденсаторы C1, C2 размещены в непосредственной близости к корпусу U1 и обеспечивают фильтрацию линий питания этой микросхемы. Конденсаторы C36–C46 размещены в непосредственной близости к корпусу U6 и обеспечивают фильтрацию линий питания этой микросхемы.

Конденсатор C5 фильтрует вход питания устройства. Элементы C6, C27, L8, C8, C9, L1, C12, C13, L3, C19, C20, L5, C25, C26, L7 формируют П-фильтры, дополнительно очищающие линии аналогового и цифрового питания от шумов и помех.

Цепочка резисторов R7, R8 позволяет задать выходное напряжение настраиваемого линейного стабилизатора U3. Конденсаторы C14, C18 и C24 обеспечивают стабильную работу линейных стабилизаторов U2, U4 и U5 соответственно.

Конденсаторы C3, C4 обеспечивают стабильный запуск кварцевого генератора, тактирующего U1.

Резисторы R5, R6, R25–R31 подтягивают цифровые линии U6 к GND или к напряжению питания.

RC-цепочки на резисторах R9–R24 и конденсаторах C7, C10, C11, C15–C17, C21–C23, C28–C34 обеспечивают низкочастотную фильтрацию входных данных ЭЭГ.

Цепочка R4, C35 задает частотные свойства активного фильтра в схеме цепи активной земли, которая выделяет низкочастотную составляющую суммарной ЭЭГ, связанную с контактными явлениями в контакте кожа–гель–электрод, инвертирует этот низкочастотный тренд и подает сигнал активной земли на тело пациента для более эффективного подавления медленного тренда потенциалов отведений ЭЭГ.

Индикаторы, выполненные на светодиодах LED1–LED3 и резисторах R1–R3 соответственно, отображают информацию о режимах работы устройства. Полученные микроконтроллером U1 данные от микросхемы U6 передаются для последующей обработки и анализа в персональный компьютер через серийный мост USB-UARTFT232RL-REEL.

Разработанное и изготовленное устройство имеет следующие технические характеристики: усиление аналогового тракта $\times 24$, полоса пропускания 0.01–100 Гц, коэффициент ослабления синфазной составляющей наводки 120 дБ, частота дискретизации 250 Гц, разрядность квантования 24 бита, габариты лабораторного образца 100×200×250 мм, масса 200 г (габариты и масса указаны без подключаемых ЭЭГ-электродов, переходника USB-UART и кабеля для связи с персональным компьютером). Питание устройства в экспериментах осуществлялось от порта USB персонального компьютера. Потребление в этом случае не превышало 35 мА.

Устройство обеспечивает регистрацию до 8 униполярных или до 8 биполярных отведений сигналов ЭЭГ (режим коммутируется программно), подавление медленного тренда сигналов с помощью линии активной земли.

Принципиальная схема устройства обеспечивает значительный запас по дальнейшей миниатюризации устройства и снижению его массы.

Результаты анализа данных

Типичный пример временных реализаций и их спектров мощности для сигнала отведения F3 ЭЭГ, зарегистрированного одновременно двумя используемыми устройствами, представлен на рис. 3. Из рис. 3, а, б видно, что реализации имеют близкую форму. Имеющиеся отличия можно объяснить несколькими различными свойствами аналоговых трактов устройств и небольшим смещением электродов двух устройств относительно друг друга.

Спектры мощности (рис. 3, в, г) рассчитывались методом Уэлча по 6-минутной реализации на каждом этапе эксперимента в окнах длительностью 60 с без перекрытия. Для уменьшения влияния эффекта утечки применялось окно Хэмминга. Анализ спектров сигналов, зарегистрированных двумя устройствами, показывает их хорошее качественное соответствие друг другу.

На спектрах видна типичная для экспериментальной выборки картина: для обоих устройств мощность осцилляций СМКП ЭЭГ растет от этапа фона R0 к этапам отдыха R1 и далее к R2. Этот эффект наиболее четко выражен для разработанного устройства. Этапы R0 и R1 для серийного устройства имеют близкие мощности.

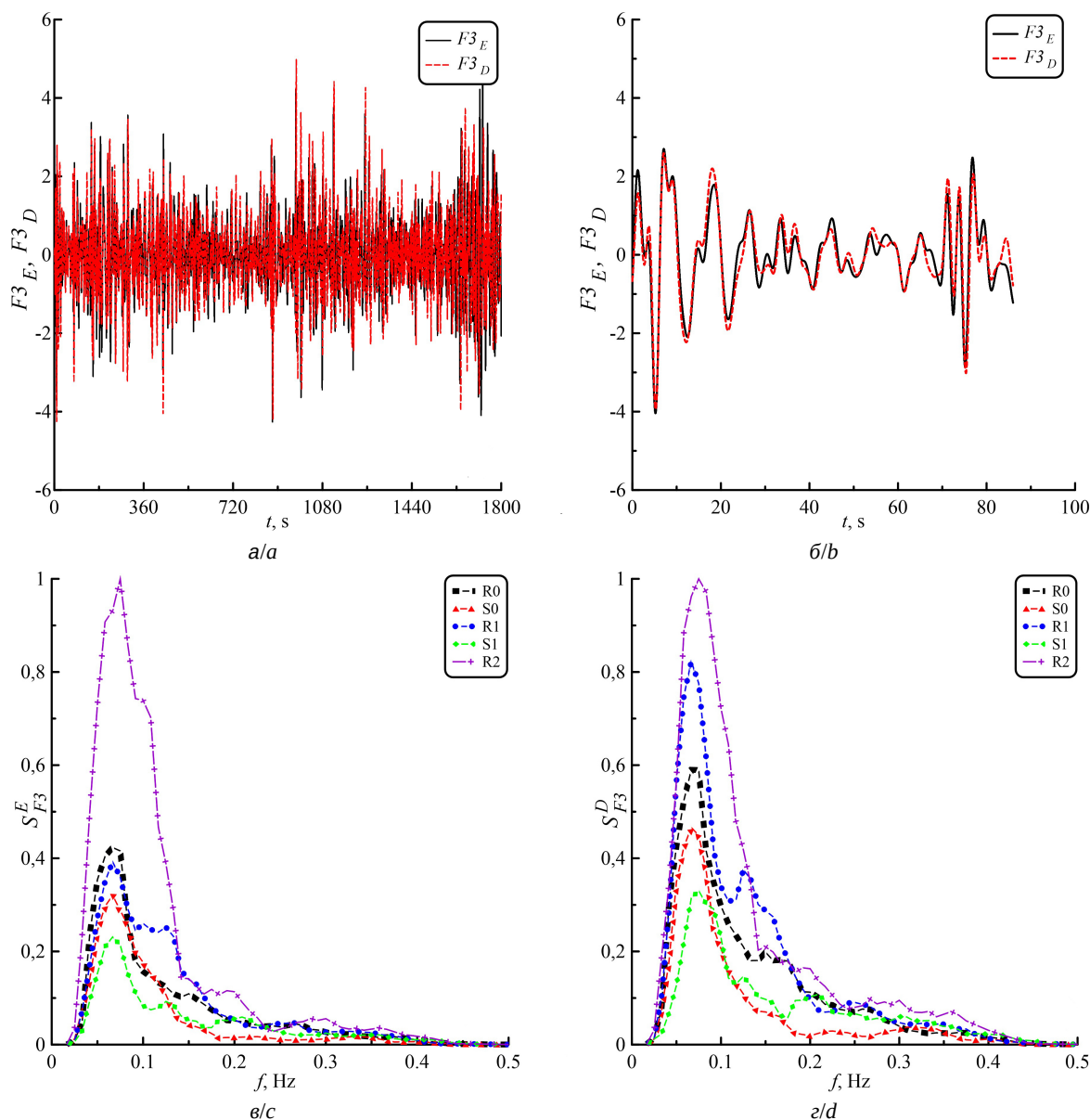


Рис. 3. Пример временных реализаций и спектров мощности сигналов отведения F3 ЭЭГ, зарегистрированных одновременно двумя приборами с добровольца № 2: а – исходные временные реализации, б – увеличенный фрагмент длительностью 100 с ограниченный по полосе 0.05–0.4 Гц (СМКП ЭЭГ). Реализация, зарегистрированная серийным устройством Энцефалан, изображена черным цветом (сплошная линия) и обозначена индексом *E*, а реализация, полученная с помощью разработанного нами устройства, показана красным цветом (прерывистая линия) и обозначена индексом *D*. Спектры мощности сигналов на разных этапах эксперимента: в – для серийного устройства Энцефалан, г – для разработанного устройства. Соответствие спектров этапам эксперимента расшифровано в легендах панелей (в и г) (цвет онлайн)

Fig. 3. An example of time realizations and power spectra of F3 EEG signals recorded simultaneously by two devices from volunteer no. 2: *a* – initial time series, *b* – an enlarged fragment with a duration of 100 s, limited in band 0.05–0.4 Hz (EEG SMCPC). The implementation recorded by the serial Encephalan device is shown in black (solid line) and designated by the index *E*, the implementation obtained using the device we developed is shown in red (dashed line) and designated by the index *D*. Signal power spectra at different stages of the experiment: *c* – for the serial Encephalan device, *d* – for the developed device. The correspondence of the spectra to the stages of the experiment is deciphered in the legends of panels (*c* and *d*) (color online)

Также видна типичная реакция на когнитивную нагрузку, выражающаяся в снижении мощности осцилляций СМКП ЭЭГ относительно этапов R0, R1, R2, причем, как правило, для

ментального арифметического теста (S1) этот эффект более выражен, чем для теста Струпа (S0). Отличия в спектральной плотности мощности между этапами R0–R2 и этапами с ко-



гнитивной нагрузкой S0, S1 для разработанного устройства более выражены, чем для серийного устройства. Это можно объяснить лучшими характеристиками аналогового тракта нашего устройства.

Авторами статьи рассчитаны значения чувствительности и специфичности диагностики состояния стресса для данных, полученных с серийного прибора и разработанного регистратора. Истинно положительным результатом считалось

диагностирование перехода из состояния покоя в состояние когнитивного стресса (уменьшение суммарной спектральной мощности в интересующей полосе частот), а истинно отрицательным результатом – переход из когнитивного стресса в состояние покоя (увеличение суммарной спектральной мощности). В таблице приведены результаты тестирования для каждого из 8 каналов ЭЭГ. Оба прибора показали близкие диагностические способности.

Значения чувствительности и специфичности, полученные в ходе эксперимента для двух приборов

Table. Sensitivity and specificity values obtained from experiment for two devices

Канал/ Channel	Энцефалан-ЭЭГР-19/26/ Encephalan-EEGR-19/26		Разработанный регистратор/ Developed recorder	
	Чувствительность/ Sensitivity	Специфичность/ Specificity	Чувствительность/ Sensitivity	Специфичность/ Specificity
O1	0.33	0.50	0.66	0.66
O2	0.83	0.50	0.50	0.50
P3	0.66	0.83	1.00	1.00
P4	1.00	1.00	0.50	0.83
C3	0.83	0.83	0.83	1.00
C4	0.66	1.00	0.66	0.83
F3	0.83	1.00	0.83	1.00
F4	1.00	1.00	0.83	0.83

Обсуждение

Разработанный аппаратно-программный комплекс может быть использован для диагностики психофизиологического состояния человека в ходе выполнения когнитивных задач. Оценка психофизиологического состояния может быть использована для исследования состояния школьников и студентов в процессе обучения, а также корректировки учебного процесса [27]. Другой сферой применения разработанного аппаратно-программного комплекса может стать отслеживание психофизиологического состояния работника в течение рабочего дня для повышения его работоспособности [28]. Своевременно сделанный перерыв или смена трудовой деятельности могут повысить трудоспособность работника. Однако предложенная методика оценки состояния человека обладает малой специфичностью, поскольку изменение суммарной спектральной мощности колебаний в предложенном диапазоне частот может быть вызвано не только изменением психофизиологического состояния, но и другими причинами, например сменой физической активности. Повысить специфичность методики

можно исключением из анализа эпох физической активности субъекта, например с помощью применения акселерометрического датчика.

Из таблицы можно сделать вывод, что оптимальными отведениями для оценки психофизиологического состояния человека по единственному каналу сигнала ЭЭГ являются отведения F3 и F4, показавшие лучшие результаты чувствительности и специфичности для обоих приборов. Также выбор этих отведений может позволить изготовить удобное для повседневного использования крепление электродов в виде ободка на голову, состоящего из 4 электродов (F3 и F4, а также A1 и A2, располагающихся на височной части головы). Применение предложенной методики к двум каналам позволит повысить специфичность методики.

Предложенная методика может быть реализована в виде программного обеспечения микроконтроллера, входящего в состав разработанного цифрового регистратора, что позволит создать автономный прибор для диагностики психофизиологического состояния человека. Измерение суммарной спектральной мощности сигнала в скользящем окне позволит диагностиро-



вать психофизиологическое состояние человека в реальном времени, однако подбор параметров и оптимизация методики для работы в реальном времени требует проведения дополнительных исследований.

К ограничениям исследования относится тот факт, что манипуляции с установкой электродов и датчиков на добровольца и само нахождение его в условиях лаборатории может влиять на его психофизиологическое состояние. Хотя в работе анализировались относительные значения индексов, учет указанных факторов важен и требует проведения отдельного исследования, в том числе с использованием анкетирования. Кроме того, в работе не рассматриваются половозрастные особенности экспериментальной выборки, которые могут влиять на результаты исследования и влияние информированности добровольцев о целях и дизайне исследования на результат. Анализировалась однородная группа, характеристики которой соответствуют характеристикам экспериментальной выборки, использованной в работе [14], так как некоторые результаты, полученные в указанной работе, используются авторами в данном исследовании. В дальнейшем планируется расширить экспериментальную выборку и изучить влияние половозрастных особенностей групп добровольцев и факт информированности их о целях исследования на результаты.

Заключение

Предложена методика диагностики состояния стресса человека по сигналам ЭЭГ по изменению суммарной спектральной мощности сигнала в диапазоне от 0.05 до 0.4 Гц. Разработан цифровой 8-канальный регистратор сигналов ЭЭГ с полосой пропускания 0.01–100 Гц, настраиваемой архитектурой каналов и настраиваемой частотой дискретизации, способный реализовывать предложенную методику для диагностики стресса. Проведено сравнение диагностических способностей разработанного регистратора и серийного аналога. Разработанный регистратор показал близкую к серийному аналогу диагностическую способность. Разработанная методика реализована в виде программного обеспечения для определения стресса. Продемонстрирована ее работоспособность для диагностики изменения психофизиологического состояния человека даже по единственному каналу ЭЭГ лобного или теменного отведения.

Список литературы

1. Ильин Е. П. Теория функциональных систем в физиологии и психологии. М. : Наука, 1978. 383 с.
2. Левитов Н. Д. О психических состояниях человека. М. : Просвещение, 1964. 360 с.
3. Hebb D. O. Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system) // *Psychological Review*. 1955. Vol. 62, iss. 4. P. 243–254. <https://doi.org/10.1037/h0041823>
4. Giannakakis G., Grigoriadis D., Giannakaki K., Simantiraki O., Roniotis A., Tsiknakis M. Review on psychological stress detection using biosignals // *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2022. Vol. 13, iss. 1. P. 440–460. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2927337>
5. Kirschbaum C., Hellhammer D. H. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: recent developments and applications // *Psychoneuroendocrinology*. 1994. Vol. 19, iss. 4. P. 313–333. [https://doi.org/10.1016/0306-4530\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0306-4530(94)90013-2)
6. Hanrahan K., McCarthy A. M., Kleiber C., Lutgendorf S., Tsalikian E. Strategies for salivary cortisol collection and analysis in research with children // *Appl. Nurs. Res.* 2006. Vol. 19, iss. 2. P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.apnr.2006.02.001>
7. Engert V., Vogel S., Efanov S. I., Duchesne A., Corbo V., Ali N., Pruessner J. C. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress // *Psychoneuroendocrinology*. 2011. Vol. 36, iss. 9. P. 1294–1302. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.02.018>
8. Puterman E., O'Donovan A., Adler N. E., Tomiyama A. J., Kemeny M., Wolkowitz O. M., Epel E. Physical activity moderates effects of stressor-induced rumination on cortisol reactivity // *Psychosom. Med.* 2011. Vol. 73, iss. 7. P. 604–611. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e318229e1e0>
9. Al-shargie F. M., Tang T. B., Babruddin N., Kiguchi M. Mental stress quantification using EEG signals // *International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences*. 2016. Vol. 56. P. 15–19.
10. Schleifer L. M., Spalding T. W., Kerick S. E., Cram J. R., Ley R., Hatfield B. D. Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work // *Psychophysiology*. 2008. Vol. 45, iss. 3. P. 356–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x>
11. Dikeçligil G. N., Mujica-Parodi L. R. Ambulatory and challenge-associated heart rate variability measures predict cardiac responses to real-world acute emotional stress // *Biol. Psychiatry*. 2010. Vol. 67, iss. 12. P. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.02.001>
12. Carroll D., Phillips A. C., Der G., Hunt K., Benzeval M. Blood pressure reactions to acute mental stress and future blood pressure status: Data from the 12-year follow-up of the West of Scotland Study // *Psychosom. Med.* 2011. Vol. 73, iss. 9. P. 737–742. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3182359808>
13. Setz C., Arnrich B., Schumm J., La Marca R., Tröster G., Ehlerth U. Discriminating Stress From Cognitive Load



- Using a Wearable EDA Device // Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2010. Vol. 14, iss. 2. P. 410–417. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2036164>
14. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Y. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S. Changes in the Power and Coupling of Infra-Slow Oscillations in the Signals of EEG Leads during Stress-Inducing Cognitive Tasks // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, iss. 14. Article number 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
15. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Ishbulatov Yu. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during the cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems // Eur. Phys. J. 2023. Spec. Top. 232. P. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
16. Everly G. S., Lating J. M. The Anatomy and Physiology of the Human Stress Response // A Clinical Guide to the Treatment of the Human Stress Response. Springer, 2013. P. 17–51.
17. Aladjalova N. A. Infra-Slow Rhythmic Oscillations of The Steady Potential of the Cerebral Cortex // Nature. 1957. Vol. 179. P. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
18. Галимов Н. М., Вильданов Э. Р., Хидиятов И. И., Кальметьев А. Х., Султанов А. Ф., Валиуллин Р. Ч. Сверхмедленные физиологические процессы головного мозга человека и животных в экспериментальных клинических исследованиях // Медицинский вестник Башкортостана. 2009. Т. 4, вып. 3. С. 63–69.
19. Lorincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz) Oscillations in Thalamic Networks // PLoS ONE. 2009. Vol. 4, iss. 2. Article number e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
20. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2012. Vol. 36, iss. 1. P. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
21. Lambertz M., Langhorst P. Simultaneous changes of rhythmic organization in brainstem neurons, respiration, cardiovascular system and EEG between 0.05 Hz and 0.5 Hz // Journal of the Autonomic Nervous System. 1998. Vol. 68. P. 58–77. [https://doi.org/10.1016/s0165-1838\(97\)00126-4](https://doi.org/10.1016/s0165-1838(97)00126-4)
22. Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R. Nonstationary Time-Series Analysis Applied to Investigation of Brainstem System Dynamics // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2000. Vol. 47, iss. 6. P. 729–737. <https://doi.org/10.1109/10.844220>
23. Ahn J. W., Ku Y., Kim H. C. A Novel Wearable EEG and ECG Recording System for Stress Assessment // Sensors. 2019. Vol. 19, iss. 9. <https://doi.org/10.3390/s19091991>
24. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions // Journal of Experimental Psychology. 1935. Vol. 18, iss. 6. P. 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
25. Schneider G. M., Jacobs D. W., Gevirtz R. N., O'Connor D. T. Cardiovascular haemodynamic response to repeated mental stress in normotensive subjects at genetic risk of hypertension: Evidence of enhanced reactivity, blunted adaptation, and delayed recovery // Hum. J. Hypertens. 2003. Vol. 17. P. 829–840. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001624>
26. Электронцефалограф-регистратор «Энцефалан-ЭЭГР-19 / 26». URL: <http://medicom-mtd.com/html/Products/eegr-main.html> (дата обращения: 11.10.2023).
27. Максимова М. В., Этуев Х. Х. Опыт применения ЭЭГ в образовании: анализ зарубежных исследований // Отечественная и зарубежная педагогика. 2023. Т. 1, № 2 (91). С. 169–185. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-91-169-185>
28. Бубнова А. Е. Комплексное использование нейрофизиологических и субъективных критериев развития критического уровня утомления при физиологическом сопровождении операторов МЧС // Журн. мед.-биол. исследований. 2020. Т. 8, № 1. С. 5–13. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2020.8.1.5>

References

1. И'ин Е. П. Теория функциональных систем в физиологии и психологии [Theory of functional systems in physiology and psychology]. Moscow, Nauka, 1978. 383 p. (in Russian).
2. Levitov N. D. О психических состояниях человека [About human mental states]. Moscow, Prosveshchenie, 1964. 360 p. (in Russian).
3. Hebb D. O. Drives and the C. N. S. (conceptual nervous system). *Psychological Review*, 1955, vol. 62, iss. 4, pp. 243–254. <https://doi.org/10.1037/h0041823>
4. Giannakakis G., Grigoriadis D., Giannakaki K., Simantiraki O., Roniotis A., Tsiknakis M. Review on psychological stress detection using biosignals. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2022, vol. 13, iss. 1, pp. 440–460. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2927337>
5. Kirschbaum C., Hellhammer D. H. Salivary cortisol in psychoneuroendocrine research: Recent developments and applications. *Psychoneuroendocrinology*, 1994, vol. 19, iss. 4, pp. 313–333. [https://doi.org/10.1016/0306-4530\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0306-4530(94)90013-2)
6. Hanrahan K., McCarthy A. M., Kleiber C., Lutgen-dorf S., Tsalikian E. Strategies for salivary cortisol collection and analysis in research with children. *Appl. Nurs. Res.*, 2006, vol. 19, iss. 2, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.apnr.2006.02.001>
7. Engert V., Vogel S., Efanov S. I., Duchesne A., Corbo V., Ali N., Pruessner J. C. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*, 2011, vol. 36, iss. 9, pp. 1294–1302. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2011.02.018>
8. Puterman E., O'Donovan A., Adler N. E., Tomiyama A. J., Kemeny M., Wolkowitz O. M., Epel E. Physical activity moderates effects of stressor-induced rumination on cortisol reactivity. *Psychosom. Med.*, 2011, vol. 73, iss. 7, pp. 604–611. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e318229e1e0>



9. Al-shargie F. M., Tang T. B., Babruddin N., Kiguchi M. Mental stress quantification using EEG signals. *International Conference for Innovation in Biomedical Engineering and Life Sciences*, 2016, vol. 56, pp. 15–19.
10. Schleifer L. M., Spalding T. W., Kerick S. E., Cram J. R., Ley R., Hatfield B. D. Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work. *Psychophysiology*, 2008, vol. 45, iss. 3, pp. 356–365. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x>
11. Dikecligil G. N., Mujica-Parodi L. R. Ambulatory and challenge-associated heart rate variability measures predict cardiac responses to real-world acute emotional stress. *Biol. Psychiatry*, 2010, vol. 67, iss. 12, pp. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.02.001>
12. Carroll D., Phillips A. C., Der G., Hunt K., Benzeval M. Blood pressure reactions to acute mental stress and future blood pressure status: Data from the 12-year follow-up of the West of Scotland Stud. *Psychosom. Med.*, 2011, vol. 73, iss. 9, pp. 737–742. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3182359808>
13. Setz C., Arnrich B., Schumm J., La Marca R., Tröster G., Ehlert U. Discriminating Stress From Cognitive Load Using a Wearable EDA Device. *Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, vol. 14, iss. 2, pp. 410–417. <https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2036164>
14. Prokhorov M. D., Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Ishbulatov Y. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S. Changes in the Power and Coupling of Infra-Slow Oscillations in the Signals of EEG Leads during Stress-Inducing Cognitive Tasks. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, iss. 14, article no. 8390. <https://doi.org/10.3390/app13148390>
15. Borovkova E. I., Hramkov A. N., Dubinkina E. S., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Ishbulatov Yu. M., Kurbako A. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D. Biomarkers of the psychophysiological state during the cognitive tasks estimated from the signals of the brain, cardiovascular and respiratory systems. *Eur. Phys. J.*, 2023, Spec. Top. 232, pp. 625–633. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00734-z>
16. Everly G. S., Lating J. M. The Anatomy and Physiology of the Human Stress Response. *A Clinical Guide to the Treatment of the Human Stress Response*. Springer, 2013, pp. 17–51.
17. Aladjalova N. A. Infra-Slow Rhythmic Oscillations of The Steady Potential of the Cerebral Cortex. *Nature*, 1957, vol. 179, pp. 957–959. <https://doi.org/10.1038/179957a0>
18. Galimov N. M., Vil'danov E. R., Khidiatov I. I., Kal'met'ev A. Kh., Sultanov A. F., Valiullin R. Ch. Ultra-slow physiological processes of the human and animal brain in experimental clinical studies. *Meditinskii vestnik Bashkortostana* [Medical Bulletin of Bashkortostan], 2009, vol. 4, iss. 3, pp. 63–69 (in Russian).
19. Lorincz M. L., Geall F., Bao Y., Crunelli V., Hughes S. W. ATP-Dependent Infra-Slow (<0.1 Hz) Oscillations in Thalamic Networks. *PLoS ONE*, 2009, vol. 4, iss. 2, article no. e4447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004447>
20. Knyazev G. G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2012, vol. 36, iss. 1, pp. 677–695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
21. Lambertz M., Langhorst P. Simultaneous changes of rhythmic organization in brainstem neurons, respiration, cardiovascular system and EEG between 0.05 Hz and 0.5 Hz. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 1998, vol. 68, pp. 58–77. [https://doi.org/10.1016/s0165-1838\(97\)00126-4](https://doi.org/10.1016/s0165-1838(97)00126-4)
22. Vandenhouten R., Lambertz M., Langhorst P., Grebe R. Nonstationary Time-Series Analysis Applied to Investigation of Brainstem System Dynamics. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2000, vol. 47, iss. 6, pp. 729–737. <https://doi.org/10.1109/10.844220>
23. Ahn J. W., Ku Y., Kim H. C. A Novel Wearable EEG and ECG Recording System for Stress Assessment. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 9. <https://doi.org/10.3390/s19091991>
24. Stroop J. R. Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 1935, vol. 18, iss. 6, pp. 643–662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
25. Schneider G. M., Jacobs D. W., Gevirtz R. N., O'Connor D. T. Cardiovascular haemodynamic response to repeated mental stress in normotensive subjects at genetic risk of hypertension: Evidence of enhanced reactivity, blunted adaptation, and delayed recovery. *Hum. J. Hypertens*, 2003, vol. 17, pp. 829–840. <https://doi.org/10.1038/sj.jhh.1001624>
26. *Elektroentsefalograf-registrator "Entsefalan-EEGR-19/26"* (Electroencephalograph-recorder "Encephalan-EEGR-19/26"). Available at: <http://medicom-mtd.com/html/Products/eegr-main.html> (accessed October 11, 2023) (in Russian).
27. Maksimova M. V., Etuev Kh. Kh. Experience of using EEG in education: Analysis of foreign studies. *Otechestvennaia i zarubezhnaia pedagogika* [Domestic and Foreign Pedagogy], 2023, vol. 1, no. 2 (91), pp. 169–185. <https://doi.org/10.24412/2224-0772-2023-91-169-185> (in Russian).
28. Bubnova A. E. Integrated use of neurophysiological and subjective criteria for the development of a critical level of fatigue with physiological support of Emergency Situations Ministry operators. *Zhurn. med.-biol. issledovani* [Journal Med.-Biol. Research], 2020, vol. 8, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2020.8.1.5> (in Russian).

Поступила в редакцию 19.10.2023; одобрена после рецензирования 14.11.2023; принята к публикации 20.11.2023
 The article was submitted 19.10.2023; approved after reviewing 14.11.2023; accepted for publication 20.11.2023



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 30–40

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 30–40

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-30-40>, EDN: CNJXOT

Научная статья

УДК 535:544



Оптическая маркировка индивидуальных клеток меланомы с использованием фотоконвертируемых микрочастиц

П. А. Демина[✉], И. О. Кожевников, А. М. Абрамова, И. Ю. Горячева

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Демина Полина Анатольевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Дистанционно управляемые системы для тераностики» Научного медицинского центра, polina.a.demina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9203-582X>

Кожевников Илья Олегович, заведующий учебной лабораторией по полупроводниковой электронике Института физики, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>

Абрамова Анна Михайловна, кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института химии, vostrikova2401@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0666-7685>

Горячева Ирина Юрьевна, доктор химических наук, профессор, директор Института химии, goryacheva_i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>

Аннотация. Фотоконвертируемые маркеры – полезный подход для проведения комплексных фундаментальных и прикладных исследований в медицине и биологии. Обычно используют фотоконвертируемые белки или красители, но они имеют ряд недостатков (низкая стабильность, необходимость генетической модификации и т. д.). Целью этого исследования была разработка безопасных и стабильных фотоконвертируемых маркеров для применения на клетках. Полимерные маркеры получали из полиэлектролитных микрокапсул методом гидротермального синтеза с флуоресцентным красителем родамином Б. Спектральные свойства изучали методами конфокальной микроскопии и спектрометрии. Фотоконверсия микрочастиц под действием лазерного излучения осуществлялась за счёт способности молекул родамина Б к гипсохромному сдвигу полосы излучения, катализируемому углеродными структурами, образующимися в оболочках микрочастиц во время гидротермального синтеза. Гидротермальный синтез, в свою очередь, существенно изменял размер и форму микрочастиц. Термообработанные полиэлектролитные микрочастицы обладали высокой стабильностью и ярким флуоресцентным сигналом относительно используемых клеточных красителей. Микрочастицы активно захватывались клетками линии мышинной меланомы V16F10, обеспечивая маркировку 70% всех клеток в популяции при соотношении 10 микрочастиц на клетку. При этом метаболическая активность не падала ниже 85%, а морфология и способность клеток V16F10 к синтезу меланина оставалась в пределах нормы. Было показано, что микрочастицы могут быть безопасно фотоконвертированы внутри клеток V16F10 под действием лазерного излучения. Предложенная стратегия полезна для комплексных исследований поведения отдельных раковых клеток меланомы в генетически и фенотипически гетерогенных популяциях, а также для изучения процесса метастазирования.

Ключевые слова: оптические метки, флуоресцентные микрочастицы, лазерное воздействие, меланин

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-23-00313, <https://rscf.ru/project/22-23-00313/>).

Для цитирования: Демина П. А., Кожевников И. О., Абрамова А. М., Горячева И. Ю. Оптическая маркировка индивидуальных клеток меланомы с использованием фотоконвертируемых микрочастиц // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 30–40. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-30-40>, EDN: CNJXOT

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Optical labeling of individual melanoma cells using photoconvertible microparticles

P. A. Demina[✉], I. O. Kozhevnikov, A. M. Abramova, I. Yu. Goryacheva

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Polina A. Demina, polina.a.demina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9203-582X>

Ilya O. Kozhevnikov, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>

Anna M. Abramova, vostrikova2401@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0666-7685>

Irina Yu. Goryacheva, goryacheva_i@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>

© Демина П. А., Кожевников И. О., Абрамова А. М.,
Горячева И. Ю., 2024



Abstract. Background and Objectives: Photoconvertible markers are a useful approach for conducting complex fundamental and applied research in medicine and biology. Usually, photoconvertible proteins or dyes are used for this, but have some disadvantages (low stability, requirement for genetic modification, etc.). The goal of this research was to develop safe and stable photoconvertible markers for cell application. **Materials and Methods:** The polymer markers were obtained from polyelectrolyte microcapsules under hydrothermal synthesis with fluorescent dye rhodamine B. The spectral properties were studied using confocal microscopy and spectrometry. **Results:** Photoconversion of microparticles under the influence of laser irradiation was carried out due to the ability of rhodamine B molecules to hypsochromic shift the emission band, catalyzed by carbon structures formed in the shells of microparticles during hydrothermal synthesis. Hydrothermal synthesis also significantly changed the size and shape of microparticles. The thermally treated polyelectrolyte microparticles had high stability and a bright fluorescent signal. The microparticles were actively internalized by the B16F10 mouse melanoma cell line, providing labeling for 70% of all cells in the population at a ratio of 10 microparticles per cell. At the same time, metabolic activity did not decrease below 85%, and the morphology and ability of B16F10 cells to synthesize melanin remained within normal limits. It has been shown that microparticles can be safely photoconverted inside B16F10 cells under laser irradiation. **Conclusion:** The proposed strategy is useful for complex studies on the behavior of individual melanoma cancer cells in genetically and phenotypically heterogeneous populations, and also for studying a metastatic process.

Keywords: optical markers, fluorescent microparticles, laser irradiation, melanin

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-23-00313, <https://www.rscf.ru/en/project/22-23-00313/>).

For citation: Demina P. A., Kozhevnikov I. O., Abramova A. M., Goryacheva I. Yu. Optical labeling of individual melanoma cells using photoconvertible microparticles. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 30–40 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-30-40>, EDN: CNJXOT

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Фотоконвертируемые метки широко востребованы во всем мире для решения ряда сложных фундаментальных и прикладных задач в биологии и медицине. К таким задачам, например, можно отнести отбор фенотипически редких и высоко инвазивных лидерных клеток в гетерогенных популяциях раковых клеток и создание очищенных линий [1], изучение поведения и миграции стволовых и прогениторных клеток в природных и биоинженерных 3D-матрицах с целью отбора наиболее подвижных клеток для регенеративной медицины [2]. Эти метки также используются для наблюдения за миграцией мелких паразитов внутри хозяина и изучения хемотаксиса на клеточном уровне [3–6].

К данным меткам можно отнести фотоконвертируемые органические красители и соединения флуорофора и тушителя через фоторасщепляемый/светочувствительный линкер [7]. Для маркировки обычно выбирают красители, у которых спектр излучения донора перекрывает спектр поглощения акцептора для обеспечения эффективного внутримолекулярного тушения флуорофора [8]. Отметим, что эти условия во многом ограничивают выбор длины волны возбуждения. Некоторые мембранные красители (такие как DiR, DiD и DiO) способны проявлять фотоконвертируемые свойства [9] и высокую флуоресцентную стабильность [10, 11]. Тем не менее, для них характерна миграция молекул красителя на мембраны соседних клеток, находящихся в тесном контакте [12], что существенно снижает точность проводимых исследований.

GFP-подобные белки, такие как Dronpa, mEosFP, Dendra, Kaede, mOrange и другие [13], способны изменять спектральное излучение при облучении ультрафиолетовым (УФ) или синим светом, что делает их востребованным инструментом для исследователей по всему миру. Однако, несмотря на явные преимущества в мечении отдельных клеточных структур (участки мембран, органеллы), эти методы предполагают генную модификацию исследуемой линии клеток [14]. Генная модификация, в свою очередь, помимо возможного существенного изменения свойств клеточной культуры, также ставит под сомнение безопасность дальнейшего использования этих полученных клеток и их клонов (в частности, стволовых клеток) в персонализированной медицине для аутотрансплантации [15]. Кроме того, некоторые GFP-подобные белки проявляют цитотоксические свойства [16]. Некоторые склонны к деградации [17] и агрегации [18]. Также для определённых клеточных культур генная модификация неприменима, так как нарушает основные свойства клеток. Это, например, характерно для клеточных линий меланомы, генная модификация которых может приводить к нарушению синтеза эндогенного меланина за счет повреждения широкого спектра генов, регулирующих выработку меланина [19]. Поэтому изучение сложных процессов миграции и метастазирования индивидуальных клеток меланомы требует подбора альтернативных методов индивидуального мечения клеток.

Достоверно известно, что полиэлектролитные флуоресцентные микрокапсулы могут ис-



пользоваться не только в качестве систем пролонгированной доставки лекарств [20], но и в качестве меток для надежной маркировки и отслеживания клеток [21]. Они легко усваиваются различными клеточными линиями и могут удерживаться ими в течение нескольких дней [22, 23]. Кроме того, возможно синтезировать микрокапсулы с фотоконвертируемыми свойствами, благодаря включению в их состав фотоконвертируемых белков [24] или красителей со склонностью к смещению пиков эмиссии в УФ-область [25–27].

Целью этой работы стало изучение влияния углеродных структур на процесс фотокатализа красителя родамин Б (RhB) и оценка изменения спектральных характеристик микрокапсул, полученных на их основе, под воздействием лазерного излучения. На примере мышинной меланомы B16F10 изучалась связь между влиянием количества микрокапсул на жизнеспособность клеток и эффективность их интернализации. Особое внимание было уделено влиянию микрокапсул на процесс синтеза меланина клетками и сохранению их жизнеспособности после маркировки с применением фотоконвертируемых микрокапсул.

1. Материалы и методы

1.1. Материалы

Поли(аллиламина гидрохлорид) (PAA, $M_w = 17.5$ кДа), натриевая соль поли(4-стиролсульфоната) (PSS, $M_w = 70$ кДа), натриевая соль декстрансульфата (DS, $M_w = 40$ кДа), родамин Б (RhB), дигидрат хлорида кальция, карбонат натрия, соляная кислота и хлорид натрия производства Sigma (Merck, Германия). Агароза RA производства Helicon (Хеликон, Россия). Фосфатно-солевой буфер (PBS), флуоресцентный краситель кальцеин (Calcein-AM) и набор для анализа пролиферации клеток МТТ производства Invitrogen (Thermo Fisher Scientific, США).

Для приготовления всех растворов использовали деионизированную воду (ДВ) (удельное сопротивление более 18.2 МОм/см) из системы очистки воды Milli-Q Direct 8 (Merck, Германия).

1.2. Фотокаталитическое разложение красителя под действием УФ излучения

Кварцевую кювету с раствором красителя RhB (0.1 мг/мл, 10 мл) без и в присутствии УНС (2.5 мг/мл) при постоянном перемешивании помещали под ртутно-кварцевую лампу ДРТ-240

(мощность 240 Вт). Облучение проходило 2 ч, каждые 30 мин отбирали пробу и проводили измерение спектральных свойств.

Спектры поглощения записывали на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Shimadzu, Япония). Спектры испускания и возбуждения получали с помощью многофункционального флуориметра Cary Eclipse (Agilent Technologies, Австралия).

1.3. Получение и характеристика термообработанных полимерных микрочастиц

Микрочастицы CaCO_3 были синтезированы по методу Володькина и соавт. [28]. Равные объемы (2 мл) эквимольных солей 0.33 М CaCl_2 и 0.33 М Na_2CO_3 смешивали при интенсивном перемешивании. Затем на микрочастицах CaCO_3 в течение 15 мин проводилась поочередная адсорбция полиэлектролитов (PAA и PSS, 1 мг/мл в 0.15 М NaCl) с последующими тремя стадиями ДВ-отмывания/центрифугирования (900 г, 1 мин). Соляная кислота использовалась для растворения частиц CaCO_3 . Затем микрокапсулы $(\text{PAA/PSS})_4$ диспергировались в водном растворе DS (1 мл, 2 мг/мл) в течение 1 ч, промывались, а затем диспергировались в водном растворе RhB (2 мл, 0.5 мг/мл). После этого суспензию помещали в автоклав высокого давления для гидротермальной обработки и нагревали при 180°C в течение 3 ч. Полученные микрочастицы трижды промывались ДВ (12000 г, 30 мин) и фильтровались через фильтр Millipore Millex-SV 5.0 мкм (Merck, Германия).

Анализ размера и морфологии поверхности термообработанных полимерных микрочастиц проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием MIRA II LMU производства TESCAN (Чехия). Образцы готовили путем нанесения капли частиц или суспензии капсул на кремниевую пластину и оставляли ее высыхать при комнатной температуре. Перед визуализацией образцы были покрыты золотой пленкой толщиной примерно 5 нм с использованием напылительного устройства Emitech K350 (Emitech Ltd, Англия). Изображения были сделаны при напряжении 30 кВ.

1.4. Флуоресцентная визуализация термообработанных полимерных микрочастиц и методика фотоконверсии

Конфокальную лазерную сканирующую микроскопию (КЛСМ) проводили с использованием конфокального лазерного сканирующего



микроскопа Leica TCS SP8 X (Leica, Германия), оснащенного объективом $20\times/0.70$ NA. Для визуализации использовался импульсный лазерный источник белого света (средняя мощность 1.5 мВт), интегрированный с Leica TCS SP8 X и позволяющий выбирать длины волн возбуждения в диапазоне 470–670 нм с точностью 1 нм. Флуоресценцию RhB возбуждали линиями 488 и 554 нм, выбранными из возможных длин волн WLL. Чтобы усилить воздействие на микрокапсулы света с длиной волны 554 нм, были выбраны наименьшая возможная область сканирования (12.11×12.11 мкм) с пространственным разрешением 512×512 пикселей и скорость сканирования 10 Гц. Для КЛСМ-визуализации микрочастиц и клеток с интернализированными микрочастицами использовали следующие длины волн возбуждения: $\lambda_{ex} = 554$ нм (диапазон обнаружения 560–650 нм, красный канал) и $\lambda_{ex} = 488$ нм (диапазон обнаружения 500–545 нм, зеленый канал).

1.5. Культивация клеточной линии B16F10

Клетки мышинной меланомы (B16F10) культивировали в модифицированной среде Игла Дульбекко (DMEM) с высоким содержанием глюкозы (4.5 г глюкозы на 1 л) с L-глутамином (Invitrogen) с добавлением 10% фетальной бычьей сыворотки и 1% раствора пенициллин-стрептомицина. Количество клеток определяли с использованием автоматического счетчика клеток Countess (Invitrogen, США) по стандартной методике с применением 0.4% раствора трипанового синего.

1.6. Исследование фотоконверсии термообработанных полимерных микрочастиц внутри клеток

Культуру клеток B16F10 ($2 \cdot 10^4$ клеток) высевали на чашки Петри диаметром 35 мм (Ibidi GmbH, Германия) за 24 ч до начала эксперимента. Далее клеткам добавляли микрочастицы и инкубировали во влажной атмосфере с 5% CO_2 при 37°C в течение еще 24 ч. Окрашивание клеток проводили по стандартной методике с применением витального красителя кальцеина-AM. Этот краситель может транспортироваться через клеточную мембрану в живые клетки, где подвергается действию внутриклеточных эстераз, отщепляющих ацетометокси группу. После этого кальцеин начинает флуоресцировать в зеленом спектре. Конфокальный микроскоп Leica TCS SP8 X (описанный выше) использовали

для фотоконверсии микрочастиц внутри клеток, а также для получения флуоресцентных изображений клеток до и после фотоконверсии. Также перед фотоконверсией микрочастицы внутри клетки с помощью КЛСМ проводили 3D-визуализацию выбранной клетки с целью подтверждения локализации микрочастицы внутри клеточной цитоплазмы. Параметры съемки клеток с микрочастицами были аналогичны описанным выше для фотоконверсии.

1.7. МТТ-тест

Клеточная культура высаживалась на 96-луночный планшет в количестве $5 \cdot 10^4$ клеток на лунку и инкубировалась в течение ночи во влажной атмосфере 5% CO_2 при 37°C . Затем в лунки добавляли по 1, 5 и 10 термообработанных полимерных микрочастиц на клетку и инкубировали в течение 24 ч. После этого культуральную среду заменяли на 100 мкл свежей с добавлением 10% раствора МТТ (12 мМ) и инкубировали планшет в течение 3 ч при 37°C . Культуру клеток без добавления микрочастиц использовали в качестве положительного контроля. В качестве отрицательного контроля использовали питательную среду с раствором МТТ без клеток. После инкубации в каждую лунку добавляли по 100 мкл раствора SDS-HCl и инкубировали ещё 4 ч для растворения кристаллов формазана. Наконец, оптическая плотность каждой лунки измерялась с помощью многомодового микропланшетного считывателя Synergy H1 (BioTek, США) при возбуждении 570 нм.

1.8. Исследование интернализации термообработанных полимерных микрочастиц

Клеточную линию высевали на 96-луночный планшет в количестве $5 \cdot 10^4$ клеток на лунку и инкубировали в идентичных условиях. После инкубации к клеткам добавляли разработанные термообработанные микрочастицы в количестве 1, 5 и 10 частиц на клетку и инкубировали в течение 24 ч для обеспечения их интернализации. Затем культуральную среду забирали, клетки 3 раза промывали фосфатным буфером для удаления незахваченных частиц и добавляли 100 мл свежей среды. Для окрашивания клеток в каждую лунку добавляли по 1 мкл разведенного в 20000 раз исходного раствора кальцеина и инкубировали в течение 30 мин. После инкубации питательную среду удаляли, клетки промывали фосфатным буфером и снима-



ли с планшета с использованием 0.05% раствора трипсина с ЭДТА. Затем клетки переносили в фосфатный буфер и исследовали с применением проточного цитометра с визуализацией ImageStream X Mark II Imaging (Luminex, США). Измерение проводили с использованием программного обеспечения INSPIRE со следующими настройками оборудования: увеличение 40×; низкий расход/высокая чувствительность; лазер 488 нм; мощность лазера 50 мВт. Исследования интернализации проводили в трех повторностях для каждой концентрации добавленных микро-частиц (1, 5 и 10 частиц на клетку). В каждой повторности анализировали 1000 объектов. Количество интернализированных частиц определяли с помощью функции Spot Count программного обеспечения IDEAS (Luminex, США).

2. Результаты и их обсуждение

Известно, что во время фотокаталитической реакции RhB может претерпевать гипсохромный сдвиг полосы излучения посредством реакции деалкилирования, приводящий к сдвигу на 10–15 нм за одну стадию деалкилирования [29, 30]. Также сообщалось, что такая реакция может фотокатализироваться тонкой пленкой TiO₂ [30, 31] или наночастицами TiO₂ [32]. Кроме того, недавно было показано, что углеродные наноструктуры (УНС) проявляют значительную фотокаталитическую активность [33–35]. Поэтому наш подход заключался в том, чтобы объединить RhB и УНС и исследовать, может ли процесс фотооконверсии RhB катализироваться УНС.

На первом этапе работы проводилось изучение изменения спектральных свойств RhB под действием УФ-излучения. Для этого водный раствор красителя без и в присутствии УНС, полученных из DS, облучали УФ лампой. УНС на основе DS были выбраны благодаря их высокой фотокаталитической активности [36]. Перед началом процесса УФ облучения растворы выдерживали в темноте в течение 30 мин для установления равновесия процессов адсорбции и десорбции на поверхности образцов.

В результате УФ облучения изменений в спектрах возбуждения для чистого раствора красителя не наблюдалось (рис. 1, I, а), в то время как для раствора красителя с УНС наблюдался гипсохромный эффект в спектрах возбуждения (рис. 1, I, б). Сдвиг максимума возбуждения через 60 мин УФ облучения составил 48 нм, а через 120 мин 54 нм. Аналогичная тенденция наблюдается в спектрах испускания: никаких изменений

в растворе чистого красителя на протяжении 120 мин эксперимента (рис. 1, II, а, б), в то время как в присутствии УНС гипсохромный эффект в спектрах испускания родамина через 120 мин УФ воздействия составил 52 нм (рис. 1, II, в, г). Также следует отметить, что изменение интенсивности испускания при длине возбуждения 520 нм для чистого родамина Б через 120 мин составило не более 10% (рис. 1, III, а), в то время как для красителя с УНС интенсивность испускания уже через 30 мин УФ облучения уменьшилась в 10 раз, а после 120 мин и вовсе стала незначительной (рис. 1, III, б).

Полученные результаты стабильности флуоресцентного красителя RhB под действием УФ-облучения согласуются с литературными данными [37], притом УНС на основе натриевой соли декстрана сульфата демонстрировали высокую фотокаталитическую активность [36]. Поэтому на следующем этапе создавались композитные термообработанные полимерные микро-частицы, модифицированные RhB, которые впоследствии будут выступать в качестве микро-реакторов для фотооконверсии красителя под действием лазерного излучения.

Общая цель синтеза заключалась в том, чтобы сблизить УНС и RhB, одновременно удерживая их в наноразмерных порах полиэлектролитной матрицы (рис. 2, а). Композитные микро-частицы были получены методом гидротермального синтеза *in situ* [38]. Для этого на первоначально сферические микро-частицы CaCO₃ методом последовательной абсорбции наносились четыре бислоя противоположно заряженных полиэлектролитов (PAH/PSS) [39]. Затем частицы CaCO₃ растворяли, а полимерные оболочки выдерживались в водном растворе DS, который использовался в качестве дополнительного источника сульфогрупп для лучшей адсорбции катионного RhB, а также в качестве источника углерода для синтеза УНС. Далее микро-капсулы центрифугировали и диспергировали в водном растворе RhB. После этого суспензию микро-капсул подвергали гидротермальной обработке при 180°C в течение 3 ч [40]. Затем термообработанные микро-частицы промывали в ДВ для удаления избытка RhB. В результате синтеза были получены термообработанные микро-частицы с инкапсулированным красителем RhB.

За счет термообработки размер частиц уменьшился с исходных 6.5 ± 1.2 мкм (рис. 2, б) до 2.4 ± 0.5 мкм (рис. 2, в, г), инкапсуляция RhB произошла в результате сжатия многослойного

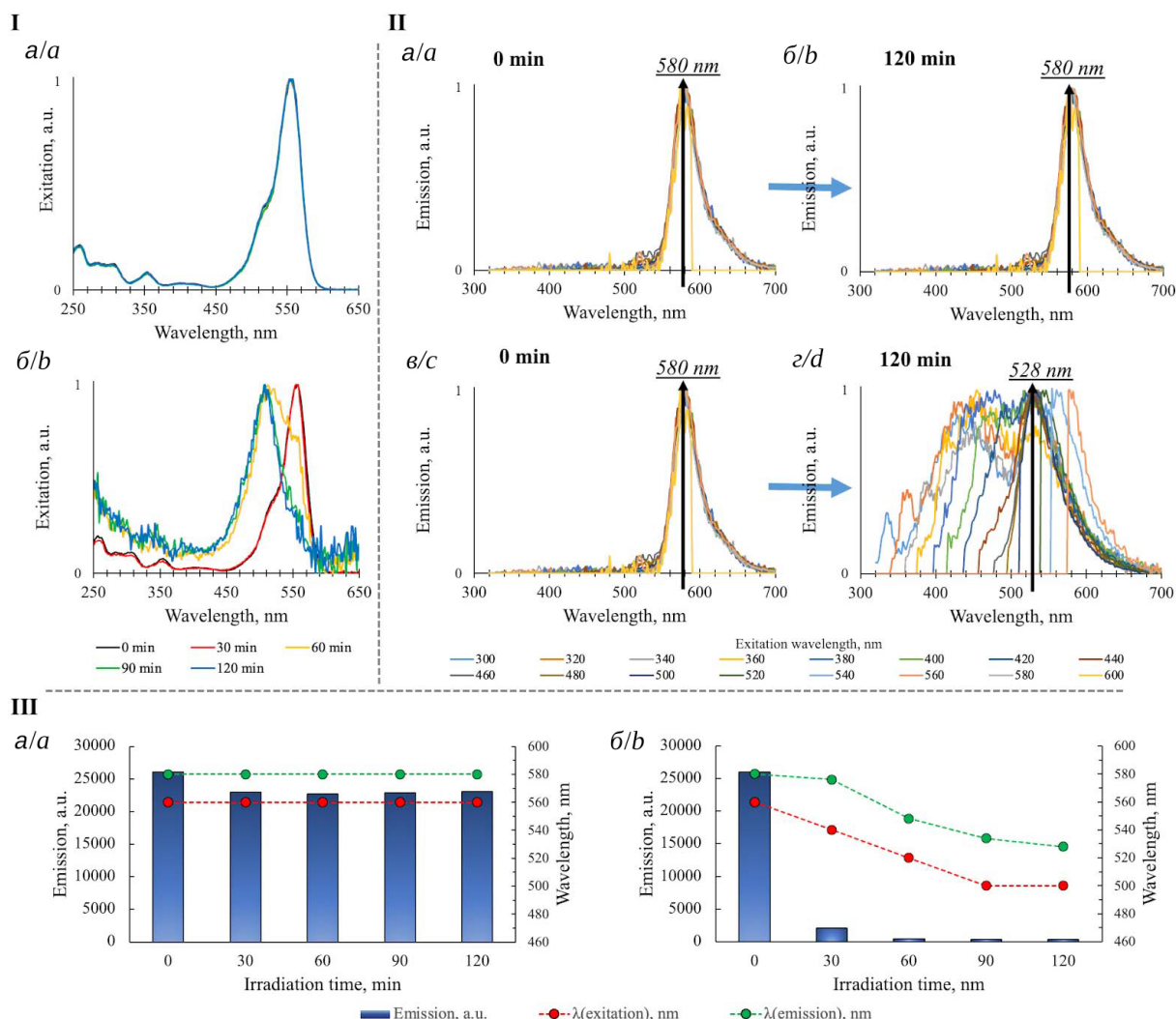


Рис. 1. I – спектры возбуждения чистого раствора флуоресцентного красителя RhB (а) и раствора красителя с УНС (б). II – спектры испускания чистого раствора флуоресцентного красителя RhB (а, б) и раствора красителя с УНС (в, г) в начальную точку УФ-обработки и после 120 мин соответственно. III – гистограмма распределения интенсивности испускания ($\lambda(\text{возбуждение})=520$ нм) во времени и изменение положения максимумов возбуждения и испускания чистого раствора флуоресцентного красителя RhB (а) и раствора красителя с УНС (б) (цвет онлайн)

Fig. 1. I – excitation spectra of fluorescent dye RhB pure solution (a) and dye solution with carbon nanostructures (b). II – emission spectra of fluorescent dye RhB pure solution (a, b) and dye solution with carbon nanostructures (c, d) before and after 120 min UV-irradiation, respectively. III – histogram of emission intensity time distribution ($\lambda(\text{excitation})=520$ nm) and changes in excitation and emission maxima position of fluorescent dye RhB pure solution (a) and dye solution with carbon nanostructures (b) (color online)

полиэлектролита. Также изменилась и морфология частиц: исходные микрокапсулы приобрели четкую сферическую форму после гидротермального синтеза (рис. 2, б–г). Полученные микрочастицы обладали яркой флуоресценцией в диапазоне 560–650 нм (рис. 2, д), что было подтверждено с помощью КЛСМ. После локального воздействия лазера с длиной волны 554 нм и плотностью мощности лазерного излучения 73 кВт/см² (рис. 2, д, выделенные квадраты) выбранные микрочастицы приобрели флуоресценцию в диапазоне 500–545 нм

(рис. 2, е, выделенные квадраты). Данное изменение флуоресценции было также подтверждено λ -сканами, полученными при длине волны возбуждения $\lambda_{ex} = 488$ нм (рис. 2, ж). Гипсохромный сдвиг максимума эмиссии указывает на эффективность процесса фотоконверсии, что обуславливает перспективность применения полученных флуоресцентных микрочастиц для оптической маркировки индивидуальных клеток.

На следующем этапе исследования была проведена подробная оценка возможности при-

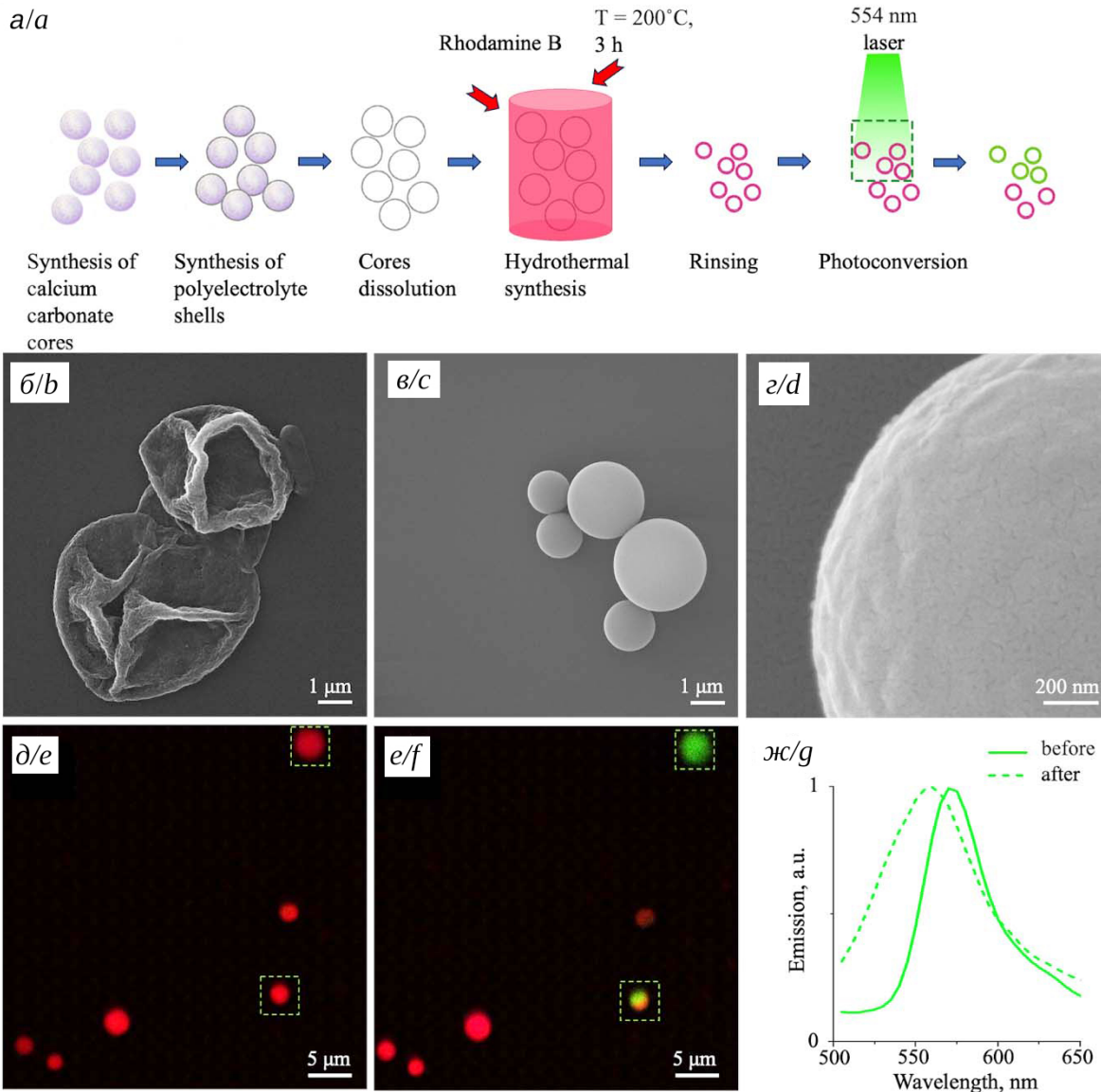


Рис. 2. Схема получения полимерных термообработанных микрочастиц (а). СЭМ изображение исходной полимерной микрокапсулы (б). СЭМ изображения полимерных термообработанных микрочастиц при различных увеличениях (в, г). КЛСМ изображения полимерных термообработанных микрочастиц до и после фотоконверсии с помощью 554 нм лазерного излучения (красный цвет соответствует $\lambda_{ex} = 554$ нм и $\lambda_{em} = 560-650$ нм, зеленый цвет соответствует $\lambda_{ex} = 488$ нм и $\lambda_{em} = 500-545$ нм) (д, е). Спектры испускания ($\lambda_{ex} = 488$ нм) полимерных термообработанных микрочастиц до и после фотоконверсии с помощью 554 нм лазерного излучения (ж) (цвет онлайн)

Fig. 2. Polymer thermal treated microparticles preparation scheme (a). SEM-image of initial polymer microcapsules (b). SEM-images of polymer thermal treated microparticles under different magnification (c, d). CLSM-images of polymer thermal treated microparticles before and after photoconversion procedure under 554 nm laser irradiation, respectively (red colour corresponds to $\lambda_{ex} = 554$ nm and $\lambda_{em} = 560-650$ nm, green colour corresponds to $\lambda_{ex} = 488$ nm and $\lambda_{em} = 500-545$ nm) (e, f). Emission spectra ($\lambda_{ex} = 488$ nm) of polymer thermal treated microparticles before and after photoconversion procedure under 554 nm laser irradiation (g) (color online)

менения разработанных фотопереключаемых микрочастиц в качестве меток при маркировке клеток меланомы мыши В16F10. Для успешной и эффективной маркировки клеток необходимо подобрать оптимальное соотношение частиц к клеткам, чтобы обеспечить желаемую степень

интернализации, не оказывая при этом негативного воздействия на отдельные клетки и всю клеточную популяцию.

В связи с этим первоначально было оценено влияние количества микрочастиц (0, 1, 5, и 10 частиц на клетку) на жизнеспособность кле-



точной культуры V16F10 по анализу параметров метаболической активности. Было обнаружено, что лишь соотношение 10 частиц на клетку приводило к значимому снижению метаболической активности (рис. 3, а). Полученные данные согласуются с данными других авторов, которые описывают, что полимерные частицы на основе PAA/PSS обладали минимальной токсичностью при низком соотношении концентраций (1–10 частиц на клетку). Выживаемость клеток оставалась в пределах нормы даже при добавлении микрочастиц, содержащих RhB [40, 41].

Известно, что интернализация микрочастиц обычно длится около часа после закрепления частицы на клеточной мембране [42]. Однако скорость и эффективность поглощения полимерных частиц может существенно различаться для разных типов клеток и зависеть как от подвижности клеток, так и от их склонности к фагоцитозу [42]. Физико-химические свойства микрочастиц и их соотношение к клеткам также оказывают существенное влияние на этот процесс [43]. Основываясь на приведенных данных, далее детально исследовалось влияние количества разра-

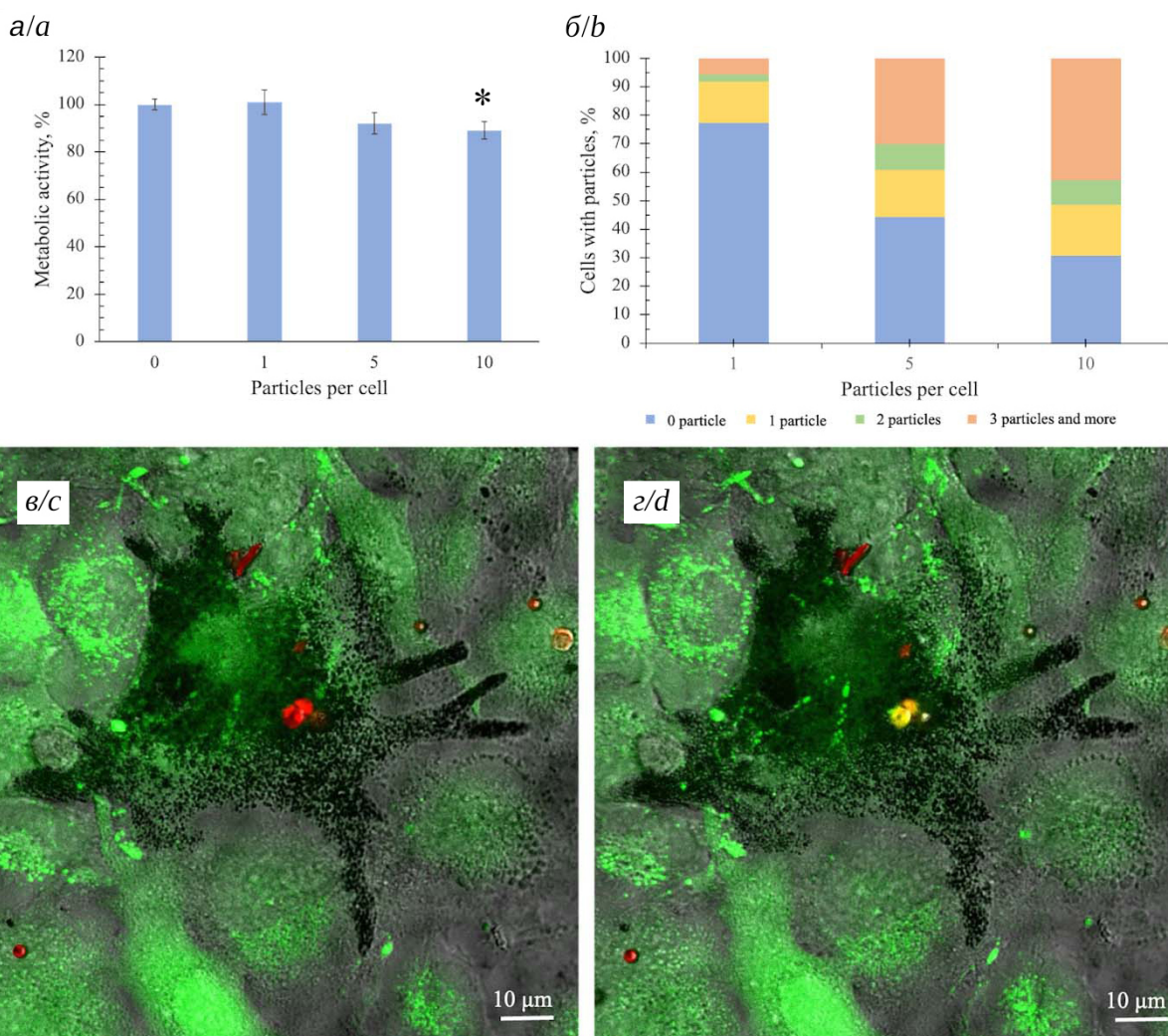


Рис. 3. Зависимость метаболической активности клеток от количества добавленных частиц. Звездочка (*) указывает на значительные отличия от контрольной группы клеток (0 частиц на клетку). Статистический анализ проводился методом ANOVA с последующим тестом Тьюки ($p < 0.05$) (а). Зависимость количества клеток, интернализировавших частицы, от концентрации добавленных частиц (б). Клетка V16F10 до и 6 ч после фотопереключения интернализированных микрочастиц соответственно (в, г) (цвет онлайн)

Fig. 3. Cell metabolic activity dependence of cells on the number of added microparticles. The asterisk (*) indicates significant differences from the control cell group (0 capsules per cell). Statistical analysis was performed by ANOVA followed by the Tukey test ($p < 0.05$) (a). Dependence of the number of cells that internalized the particles on the concentration of the added microparticles (b). V16F10 cell before and 6 h after photoconversion procedure of internalized microparticles, respectively (c, d) (color online)



батываемых фотопереключаемых частиц на эффективность их интернализации. Было показано, что количество интернализированных микрочастиц находилось в прямой зависимости от общего соотношения частиц к клеткам (рис. 3, б). Эффективность интернализации для соотношения 5 и 10 частиц на клетку достигала 55 и 70% соответственно.

На последнем этапе исследования была оценена возможность маркировки клеток линии V6F10 с помощью индуцированной лазером фотоконверсии захваченных флуоресцентных микрочастиц. Интернализированные капсулы до фотопереключения четко идентифицировались в цитоплазме клеток, окрашенных кальцеином (рис. 3, в). Отметим также, что клетки имели типичную морфологию. Выбранное количество капсул было фотоконвертировано с помощью лазерного излучения (рис. 3, г). Фотоконверсия оставалась стабильной, а переключенные капсулы были хорошо видны даже спустя 6 ч. Сохранение яркого флуоресцентного сигнала от цитоплазмы клеток (от кальцеина) свидетельствовало о том, что клетка оставалась живой как сразу после фотоконвертации, так и спустя 6 ч. Этот результат является особенно значимым, так как лазерное воздействие само по себе может вызвать гибель клетки меланомы из-за наличия в ней эндогенного меланина, способного поглощать световую энергию в широком диапазоне и конвертировать её в тепло [44]. Поэтому параметры и условия лазерного воздействия должны быть тщательно подобраны. В данном случае гибель клеток не наблюдалась благодаря точной фокусировке лазера в конфокальном микроскопе непосредственно на микрочастице. Лишь минимальный участок цитоплазмы и мембраны подвергался лазерному воздействию, что, вероятно, было недостаточно для критического повышения температуры внутри клетки. Стоит также отметить, что инкубация микрочастиц с клетками, равно как и фотоконверсия, не приводила к нарушению синтеза меланина в клетках линии V16F10, что наглядно продемонстрировано на рис. 3, в, г.

Выводы

Термообработанные полиэлектролитные микрочастицы с родамином Б обладают высокой стабильностью и ярким флуоресцентным сигналом, что делает их перспективным маркером для отслеживания клеток. Возможность фотоконверсии, индуцированной лазерным

излучением, открывает дополнительные возможности для маркировки отдельных клеток. Процесс фотоконверсии микрочастиц связан со способностью родамина Б к гипсохромному сдвигу полосы излучения. Углеродные структуры, образующиеся в оболочках микрочастиц во время гидротермального синтеза, способны выступать в качестве катализатора, ускоряя процесс деалкилирования родамина Б. Помимо этого, гидротермальный синтез приводит к существенному уменьшению размера микрочастиц и изменению формы, что в целом может являться преимуществом для их дальнейшего применения в клеточных экспериментах.

Клетки линии мышинной меланомы V16F10 активно захватывают флуоресцентные фотоконвертируемые микрочастицы, обеспечивая высокую степень маркировки. При этом минимальный токсический эффект (снижение метаболической активности до 85%) проявляется только при соотношении 10 микрочастиц на клетку, что тем не менее не является критичным для проведения клеточных экспериментов, но должно быть учтено при планировании исследований. Также не было выявлено изменения морфологического состояния клеток меланомы или нарушения синтеза меланина под действием интернализированных частиц. Показано, что термообработанные микрочастицы могут быть фотоконвертированы внутри клеток V16F10 под действием лазерного излучения, не вызывая при этом гибели маркированных клеток.

В целом все представленные данные свидетельствуют о том, что термообработанные полиэлектролитные микрочастицы, содержащие родамин Б, могут стать перспективным подходом для изучения процессов миграции клеток меланомы, что открывает широкие перспективы их применения в качестве маркера для исследования процессов метастазирования.

Список литературы/References

1. Konen J., Summerbell E., Dwivedi B., Galior K., Hou Y., Rusnak L., Chen A., Saltz J., Zhou W., Boise L. H., Vertino P., Cooper L., Salaita K., Kowalski J., Marcus A. I. Image-guided genomics of phenotypically heterogeneous populations reveals vascular signalling during symbiotic collective cancer invasion. *Nat. Commun.*, 2017, vol. 8, article no. 15078. <https://doi.org/10.1038/ncomms15078>
2. Caires H. R., Gomez-Lazaro M., Oliveira C. M., Gomes D., Mateus D. D., Oliveira C., Barrias C. C., Barbosa M. A., Almeida C. R. Finding and tracing human



- MSC in 3D microenvironments with the photoconvertible protein Dendra2. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, article no. 10079. <https://doi.org/10.1038/srep10079>
3. Adam V., Berardozi R., Byrdin M., Bourgeois D. Phototransformable Fluorescent Proteins: Future Challenges. *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 2014, vol. 20, pp. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2014.05.016>
 4. Pletnev S., Shcherbakova D. M., Subach O. M., Pletneva N. V., Malashkevich V. N., Almo S. C., Dauter Z., Verkhusha V. V. Orange Fluorescent Proteins: Structural Studies of LSSmOrange, PSmOrange and PSmOrange2. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, article no. e99136. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099136>
 5. Terskikh A., Fradkov A., Ermakova G., Zaraisky A., Tan P., Kajava A. V., Zhao X., Lukyanov S., Matz M., Kim S., Weissman I., Siebert P. “Fluorescent Timer”: Protein That Changes Color with Time. *Science*, 2000, vol. 290, article no. 1585. <https://doi.org/10.1126/science.290.5496.1585>
 6. Wachter R. M., Watkins J. L., Kim H. Mechanistic Diversity of Red Fluorescence Acquisition by GFP-like Proteins. *Biochemistry*, 2010, vol. 49, iss. 35, pp. 7417–7427. <https://doi.org/10.1021/bi100901h>
 7. Pellois J.-P., Hahn M. E., Muir T. W. Simultaneous Triggering of Protein Activity and Fluorescence. *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, vol. 126, pp. 7170–7171. <https://doi.org/10.1038/srep10079>
 8. Johansson M. K., Cook R. M. Intramolecular Dimers: A New Design Strategy for Fluorescence-Quenched Probes. *Chem A Eur. J.*, 2003, vol. 9, iss. 15, pp. 3466–3471. <https://doi.org/10.1002/chem.200304941>
 9. Carlson A. L., Fujisaki J., Wu J., Runnels J. M., Turcotte R., Celso C. Lo, Scadden D. T., Strom T. B., Lin C. P. Tracking Single Cells in Live Animals Using a Photoconvertible Near-Infrared Cell Membrane Label. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, article no. e69257. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069257>
 10. Basel M. T. Lipophilic Near-Infrared Dyes for In Vivo Fluorescent Cell Tracking. In: Basel M., Bossmann S., eds. *Cell Tracking. Methods in Molecular Biology*, 2020, vol. 2126. Humana, New York, NY, 2020, pp. 33–43. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0364-2_4
 11. Yeo D., Wiraja C., Chuah Y. J., Gao Y., Xu C. A Nanoparticle-based Sensor Platform for Cell Tracking and Status/Function Assessment. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, article no. 14768. <https://doi.org/10.1038/srep14768>
 12. Lassailly F., Griessinger E., Bonnet D. “Microenvironmental contaminations” induced by fluorescent lipophilic dyes used for noninvasive *in vitro* and *in vivo* cell tracking. *Blood*, 2010, vol. 115, iss. 26, pp. 5347–5354. <https://doi.org/10.1182/blood-2009-05-224030>
 13. Shcherbakova D. M., Sengupta P., Lippincott-Schwartz J., Verkhusha V. V. Photocontrollable Fluorescent Proteins for Superresolution Imaging. *Annu. Rev. Biophys.*, 2014, vol. 43, pp. 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-051013-022836>
 14. Sattarzadeh A., Saberianfar R., Zipfel W. R., Menassa R., Hanson M. R. Green to red photoconversion of GFP for protein tracking *in vivo*. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, article no. 11771. <https://doi.org/10.1038/srep11771>
 15. Gai M., Frueh J., Kudryavtseva V. L., Yashchenok A. M., Sukhorukov G. B. Poly(lactic Acid Sealed Polyelectrolyte Multilayer Microchambers for Entrapment of Salts and Small Hydrophilic Molecules Precipitates. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, iss. 19, pp. 16536–16545. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b03451>
 16. Shemiakina I. I., Ermakova G. V., Cranfill P. J., Baird M. A., Evans R. A., Souslova E. A., Staroverov D. B., Gorokhovatsky A. Y., Putintseva E. V., Gorodnicheva T. V., Chepurnykh T. V., Strukova L., Lukyanov S., Zaraisky A. G., Davidson M. W., Chudakov D. M., Shcherbo D. A monomeric red fluorescent protein with low cytotoxicity. *Nat. Commun.*, 2012, vol. 3, article no. 1204. <https://doi.org/10.1038/ncomms2208>
 17. Zhang L., Gurskaya N. G., Merzlyak E. M., Staroverov D. B., Mudrik N. N., Samarkina O. N., Vinokurov L. M., Lukyanov S., Lukyanov K. A. Method for real-time monitoring of protein degradation at the single cell level. *Biotechniques*, 2007, vol. 42, iss. 4, pp. 446–450. <https://doi.org/10.2144/000112453>
 18. Miyawaki A. Proteins on the move: Insights gained from fluorescent protein technologies. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, 2011, vol. 12, pp. 656–668. <https://doi.org/10.1038/nrm3199>
 19. Bajpai V. K., Swigut T., Mohammed J., Naqvi S., Arreola M., Tycko J., Kim T. C., Pritchard J. K., Bassik M. C., Wysocka J. A genome-wide genetic screen uncovers determinants of human pigmentation. *Science*, 2023, vol. 381, article no. aede6658. <https://doi.org/10.1126/science.aede6289>
 20. Kopach O., Zheng K., Dong L., Sapelkin A., Voitenko N., Sukhorukov G. B., Rusakov D. A. Nano-engineered microcapsules boost the treatment of persistent pain. *Drug Deliv.*, 2018, vol. 25, pp. 435–447. <https://doi.org/10.1080/10717544.2018.1431981>
 21. Sapach A. Y., Sindeeva O. A., Nesterchuk M. V., Tsitirina A. A., Mayorova O. A., Prikhozhenko E. S., Verkhovskii R. A., Mikaelyan A. S., Kotelevtsev Y. V., Sukhorukov G. B. Macrophage In Vitro and In Vivo Tracking via Anchored Microcapsules. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 14, iss. 46, pp. 51579–51592. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c12004>
 22. Sukhorukov G. B., Rogach A. L., Zebli B., Liedl T., Skirtach A. G., Köhler K., Antipov A. A., Gaponik N., Susha A. S., Winterhalter M., Parak W. J. Nano-engineered Polymer Capsules: Tools for Detection, Controlled Delivery, and Site-Specific Manipulation. *Small*, 2005, vol. 1, iss. 2, pp. 194–200. <https://doi.org/10.1002/sml.200400075>
 23. Timin A. S., Gould D. J., Sukhorukov G. B. Multi-layer microcapsules: Fresh insights and new applications. *Expert Opin. Drug Deliv.*, 2017, vol. 14, iss. 5, pp. 583–587. <https://doi.org/10.1080/17425247.2017.1285279>
 24. Harrington W. N., Novoselova M. V., Bratashov D. N., Khlebtsov B. N., Gorin D. A., Galanzha E. I., Zharov V. P. Photoswitchable Spasers with a Plasmonic Core and Photoswitchable Fluorescent Proteins. *Sci.*



- Rep., 2019, vol. 9, article no. 12439. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48335-6>
25. Riehl M., Harms M., Göttel B., Kubas H., Schiroky D., Mäder K. Acid-induced degradation of widely used NIR dye DiR causes hypsochromic shift in fluorescence properties. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 2019, vol. 132, pp. 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2019.02.031>
26. Li J., Ji A., Lei M., Xuan L., Song R., Feng X., Lin H., Chen H. Hypsochromic Shift Donor–Acceptor NIR-II Dye for High-Efficiency Tumor Imaging. *J. Med. Chem.*, 2023, vol. 66, iss. 12, pp. 7880–7893. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.3c00253>
27. Takemura K., Imato K., Ooyama Y. Mechanofluorochromism of (D– π) 2 A-type azine-based fluorescent dyes. *RSC Adv.*, 2022, vol. 12, pp. 13797–13809. <https://doi.org/10.1039/D2RA02431D>
28. Volodkin D. V., Petrov A. I., Prevot M., Sukhorukov G. B. Matrix Polyelectrolyte Microcapsules: New System for Macromolecule Encapsulation. *Langmuir*, 2004, vol. 20, iss. 8, pp. 3398–3406. <https://doi.org/10.1021/la036177z>
29. Evans N. A. Photofading of Rhodamine Dyes: III. The Effect of Wavelength on the Fading of Rhodamine B. *Text. Res. J.*, 1973, vol. 43, iss. 12, pp. 697–700. <https://doi.org/10.1177/004051757304301201>
30. Butkevich A. N., Bossi M. L., Lukinavicius G., Hell S. W. Triarylmethane Fluorophores Resistant to Oxidative Photobleaching. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, vol. 141, iss. 2, pp. 981–989. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b11036>
31. Cassidy J. P., Tan J. A., Wustholz K. L. Probing the Aggregation and Photodegradation of Rhodamine Dyes on TiO₂. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, iss. 29, pp. 15610–15618. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b04604>
32. Lee S. Y., Kang D., Jeong S., Do H. T., Kim J. H. Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Dye by TiO₂ and Gold Nanoparticles Supported on a Floating Porous Polydimethylsiloxane Sponge under Ultraviolet and Visible Light Irradiation. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, iss. 8, pp. 4233–4241. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04127>
33. Zhou Y., Zahran E. M., Quiroga B. A., Perez J., Mintz K. J., Peng Z., Liyanage P. Y., Pandey R. R., Chusuei C. C., Leblanc R. M. Size-dependent photocatalytic activity of carbon dots with surface-state determined photoluminescence. *Appl. Catal. B Environ.*, 2019, vol. 248, pp. 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.02.019>
34. Xu N., Huang H., Ouyang H., Wang H. Preparation of the heterojunction catalyst N-doping carbon quantum dots/P25 and its visible light photocatalytic activity. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, article no. 9971. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46277-7>
35. Phang S. J., Tan L.-L. Recent advances in carbon quantum dot (CQD)-based two dimensional materials for photocatalytic applications. *Catal. Sci. Technol.*, 2019, vol. 9, pp. 5882–5905. <https://doi.org/10.1039/C9CY01452G>
36. Stepukhovich M. S., Abramova A. M., Bakal A. A., Goryacheva I. Yu. Novel degradable photocatalysts for wastewater treatment. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 148–158 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-148-158>
37. Chen F., Liu W., Li H., Deng T., Xing B., Liu F. Rhodamine Fluorophores for STED Super-Resolution Biological Imaging. *Anal. Sens.*, 2022, vol. 2, iss. 3, article no. e202100066. <https://doi.org/10.1002/anse.202100066>
38. Demina P. A., Sindeeva O. A., Abramova A. M., Prikhozhenko E. S., Verkhovskii R. A., Lengert E. V., Sapelkin A. V., Goryacheva I. Y., Sukhorukov G. B. Fluorescent Convertible Capsule Coding Systems for Individual Cell Labeling and Tracking. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, vol. 13, iss. 17, pp. 19701–19709. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02767>
39. Sukhorukov G. B., Donath E., Davis S., Lichtenfeld H., Caruso F., Popov V. I., Möhwald H. Stepwise polyelectrolyte assembly on particle surfaces: A novel approach to colloid design. *Polym. Adv. Technol.*, 1998, vol. 9, iss. 10–11, pp. 759–767. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1581\(199810\)9:10/11<759::AID-PAT846>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1581(199810)9:10/11<759::AID-PAT846>3.0.CO;2-Q)
40. An Z., Kavanoor K., Choy M. L., Kaufman L. J. Polyelectrolyte microcapsule interactions with cells in two- and three-dimensional culture. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, 2009, vol. 70, iss. 1, pp. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.12.022>
41. Gao H., Goriacheva O. A., Tarakina N. V., Sukhorukov G. B. Intracellularly Biodegradable Polyelectrolyte/Silica Composite Microcapsules as Carriers for Small Molecules. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, vol. 8, iss. 15, pp. 9651–9661. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01921>
42. Chen Y., Sukhorukov G. B., Novak P. Visualising nanoscale restructuring of a cellular membrane triggered by polyelectrolyte microcapsules. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, pp. 16902–16910. <https://doi.org/10.1039/C8NR03870H>
43. Brueckner M., Jankuhn S., Jülke E.-M., Reibetanz U. Cellular interaction of a layer-by-layer based drug delivery system depending on material properties and cell types. *Int. J. Nanomedicine*, 2018, vol. 13, pp. 2079–2091. <https://doi.org/10.2147/IJN.S153701>
44. Madkhali N., Alqahtani H. R., Al-Terary S., Laref A., Hassib A. Control of optical absorption and fluorescence spectroscopies of natural melanin at different solution concentrations. *Opt. Quantum Electron.*, 2019, vol. 51, article no. 227. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1936-3>

Поступила в редакцию 30.11.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 20.12.2023
The article was submitted 30.11.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 20.12.2023



НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 41–51
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 41–51
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-41-51>, EDN: AUQNBD

Научная статья
УДК 537.311.322

Деградация проводимости низкоразмерных наноструктурированных полупроводниковых слоев при длительном протекании постоянного тока

Л. А. Кочкуров¹✉, С. С. Волчков¹, М. Ю. Васильков¹, И. А. Плугин¹,
А. А. Климова¹, Д. А. Зимняков^{1,2}

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

Кочкуров Леонид Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем», lkochkurov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3360-8878>

Волчков Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории акустооптоэлектроники и молекулярной спектроскопии, volchkov93@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3928-8836>

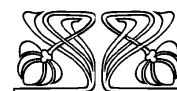
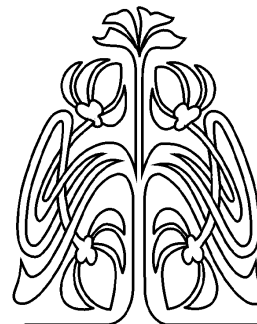
Васильков Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории акустооптоэлектроники и молекулярной спектроскопии, vasilk.mikhail@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1579-1194>

Плугин Илья Анатольевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории акустооптоэлектроники и молекулярной спектроскопии, ilyaplygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1066-1596>

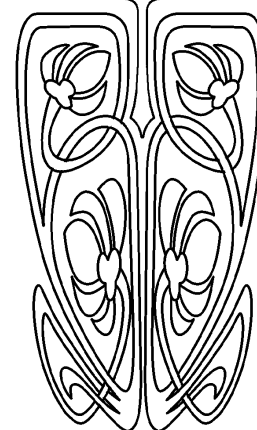
Климова Анжелика Андреевна, студентка, klimova435040@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7237-2979>

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹заведующий кафедрой физики, ²главный научный сотрудник, zimnyukov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований деградации омической проводимости низкоразмерных полупроводниковых наноструктур на основе оксида индия, осажденных на кремниевые подложки со встречно-электродными системами. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о наличии перехода «полупроводник – диэлектрик», проявляющегося в значительном обеднении ансамблей подвижных носителей заряда в проводящих мостиках при захвате носителей поверхностными ловушками при длительном протекании постоянного тока с последующей низкой релаксационной способностью исследуемых систем. Для исследования влияния толщины образца на порог протекания и критический показатель проводимости композитов металл-диэлектрик была использована численная модель резистивной сетки с кубической формой ячеек. В результате проведенных исследований было выявлено, что небольшое увеличение толщины квазидвумерной структуры приводит к значительному уменьшению порога протекания и возрастанию критического показателя проводимости. В совокупности экспериментальные данные и результаты моделирования представляют оценки критического показателя проводимости исследуемой структуры. На основе этих оценок и данных микроскопического и профилометрического анализа исследуемая система может быть рассмотрена как переходная между двумерной и трехмерной проводящей матрицей.



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Ключевые слова: проводимость, наночастицы, межэлектродные мостики, порог протекания, критический показатель, оксид индия

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00612).

Для цитирования: Кочкуров Л. А., Волчков С. С., Васильков М. Ю., Плугин И. А., Климова А. А., Зимняков Д. А. Дegradация проводимости низкоразмерных наноструктурированных полупроводниковых слоев при длительном протекании постоянного тока // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 41–51. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-41-51>, EDN: AUQNBD

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Degradation of conductivity of low-dimensional nanostructured semiconductor layers under long-term dc current flow

L. A. Kochkurov¹✉, S. S. Volchkov¹, M. Yu. Vasilkov¹, I. A. Plugin¹, A. A. Klimova¹, D. A. Zimnyakov^{1,2}

¹Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

²Institute for Problems of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

Leonid A. Kochkurov, lkochkurov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3360-8878>

Sergey S. Volchkov, volchkov93@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3928-8836>

Mikhail Yu. Vasilkov, vasilk.mikhail@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1579-1194>

Ilya A. Plugin, ilyaplygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1066-1596>

Angelika A. Klimova, klimova435040@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7237-2979>

Dmitry A. Zimnyakov, zimnyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Abstract. Background and Objectives: Electrically conductive layers of densely packed semiconductor nanoparticles are a promising material platform for creating, in particular, multisensor chemoresistive systems. A significant disadvantage of multielement chemoresistive sensors of this type is the long-term instability of the parameters of individual elements and large values of response and relaxation times to the initial state. Such a process can be considered as a transition “semiconductor – insulator” in dispersed disordered systems, and the dynamics of the transition can be described in the framework of the percolation theory. The aim of this work was experimental studies and statistical modeling of the effect of degradation of ohmic conductivity of low-dimensional layers of densely packed indium oxide (In_2O_3) nanoparticles under long-term DC current flow. Dispersed nanostructured layers of indium oxide were chosen as an object of study due to the specific electrophysical properties of this indirect-gap n-type semiconductor. **Materials and Methods:** Experimental studies of the effect of degradation of ohmic conductivity of dispersed semiconductor structures under long-term exposure to direct current were carried out using specially prepared samples consisting of densely packed indium oxide nanoparticles (In_2O_3). The effect of structure thickness on the percolation threshold as well as the critical index of the conductivity function was numerically investigated. A cubic resistor network was considered for numerical analysis of the conductivity of a two-phase percolation structure. The network was uniformly and randomly filled with conducting and insulating nodes. **Results:** One of the main observed features of electron transfer in bridge disordered ensembles of nanoparticles of the studied systems is the achievement of percolation threshold at long-term exposure to direct current and extremely low rate of recovery of deteriorated conductivity after removal of exposure. The established value of the critical conductivity index for the studied structures has an intermediate value between theoretical estimates for three-dimensional and two-dimensional percolation systems, which allows us to consider the studied structures as transitional between two-dimensional and three-dimensional systems. **Conclusion:** The obtained results can be used as a physical basis for the development of new approaches to the creation of thin structures with limited conductivity.

Keywords: conductivity, nanoparticles, inter-electrode bridges, percolation threshold, critical exponent, indium oxide

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-29-00612).

For citation: Kochkurov L. A., Volchkov S. S., Vasilkov M. Yu., Plugin I. A., Klimova A. A., Zimnyakov D. A. Degradation of conductivity of low-dimensional nanostructured semiconductor layers under long-term dc current flow. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 41–51 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-41-51>, EDN: AUQNBD

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Электропроводящие слои плотноупакованных полупроводниковых наночастиц толщиной от нескольких десятков нанометров до единиц микрометров являются перспективной материальной платформой для создания, в частности мультисенсорных хеморезистивных систем [1–4]. Нанесение подобных слоев на диэлектрические подложки со встречно-штыревыми электродными системами [5–7] позволяет создать газочув-

ствительные многоэлементные системы, реагирующие на наличие в окружающей атмосфере различных примесей. Селективность отклика достигается в результате линейного дискриминантного анализа [8, 9] совокупности сигналов от пар электродов противоположных полярностей, частично замыкаемых участками нанесенного слоя. Различия в локальных проводимостях этих участков, обусловленные стохастичностью наносимых слоев, приводят к существенному разбросу реги-



стрируемых откликов от мультисенсорной системы подобного типа и в то же время позволяют производить дискриминацию векторных откликов системы от различных реагентов [10, 11].

Как правило, в хеморезистивных многоэлементных сенсорах этого типа информативными параметрами являются значения омической проводимости межэлектродных промежутков, определяемые при постоянном интегральном токе через сенсорную структуру. С целью повышения чувствительности в процессе измерений производится нагрев подложки с сенсорным слоем до температуры порядка 200–300°C. Для проводящих межэлектродных участков сенсорных слоев шириной от 50 до 100 микрометров омическая проводимость находится в интервале от 10^{-7} до 10^{-9} См и существенно изменяется в зависимости от концентрации регистрируемых примесей в окружающей атмосфере вследствие окислительно-восстановительных процессов на поверхности наночастиц.

Существенным недостатком многоэлементных хеморезистивных сенсоров подобного типа является долговременная нестабильность параметров отдельных элементов (чувствительности к вариациям концентрации регистрируемых примесей, проводимости при нулевой концентрации) и большие значения времен отклика и релаксации в исходное состояние. Это, в первую очередь, обусловлено стохастичностью процесса локального переноса зарядов (внутричастичного и межчастичного) при протекании тока через структуру, а также локальными изменениями потока носителей зарядов на уровне отдельных частиц вследствие, например, захвата носителей поверхностными и объемными ловушками или их освобождения из неглубоких ловушек благодаря термическим флуктуациям. Можно предположить, что при малых значениях средней концентрации свободных носителей заряда в слое и больших значениях концентрации дефектов-ловушек перенос зарядов будет происходить в течение конечного времени. На завершающей стадии переноса будет происходить достаточно быстрая деградация омической проводимости структуры (в определенных случаях необратимая). Подобный процесс можно рассматривать как переход «полупроводник – диэлектрик» в дисперсных неупорядоченных системах, а динамика перехода может быть описана в рамках теории перколяции.

Подобные исследования представляют не только практический интерес в части улучше-

ния функциональных характеристик хеморезистивных сенсоров на основе плотноупакованных слоев полупроводниковых наночастиц. Анализ процессов деградации омической проводимости частично проводящих слоев этого типа при длительном протекании через них постоянного тока позволит уточнить существующие фундаментальные представления о совокупности микроскопических механизмов, влияющих на среднюю концентрацию и подвижность свободных носителей в слое.

Целью данной работы явились экспериментальные исследования и статистическое моделирование эффекта деградации омической проводимости низкоразмерных слоев плотноупакованных наночастиц оксида индия при длительном протекании постоянного тока. Дисперсные наноструктурированные слои In_2O_3 выбраны в качестве объекта исследования вследствие специфических электрофизических свойств этого непрямозонного полупроводника n-типа. В частности, для In_2O_3 достаточно высока эффективность электрон-фонного взаимодействия [12, 13], что предположительно приводит к проводимости поляронного типа. Значительное число дефектов-ловушек в наночастицах приводит к высокой вероятности захвата ими подвижных носителей заряда. Совокупность этих факторов обуславливает малые значения эффективной подвижности носителей во внешнем электрическом поле и быстрое обеднение ансамблей подвижных носителей заряда в слоях при отсутствии эффективных механизмов рекомбинации.

1. Экспериментальные данные о деградации омической проводимости низкоразмерных слоев плотноупакованных наночастиц оксида индия

Экспериментальные исследования эффекта деградации омической проводимости дисперсных полупроводниковых структур при длительном воздействии постоянного тока проводились с использованием специально приготовленных образцов, состоящих из плотноупакованных наночастиц оксида индия (In_2O_3). Полученные данные сопоставлялись с результатами ранее проведенных исследований деградации омической проводимости низкоразмерных частично проводящих структур, состоящих из плотноупакованных наночастиц диоксида титана (анатаза) [14]. Как и оксид индия, анатаз относится к классу широкозонных полупроводниковых материалов с проводимостью n-типа. Кроме того, и анатаз,

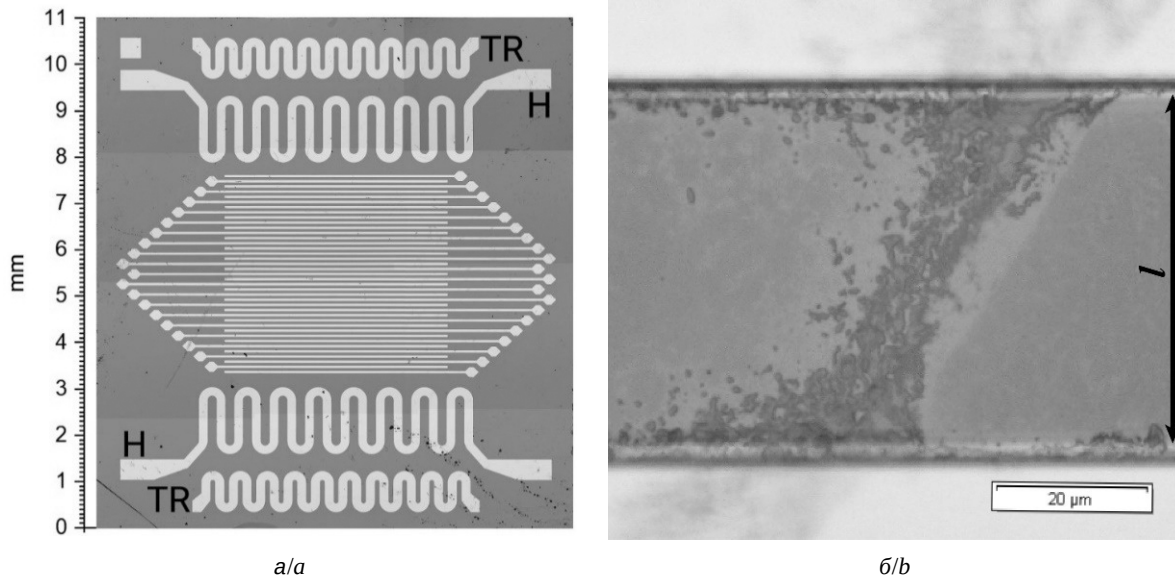


Рис. 1. Изображение подложки со встречно-штыревой системой электродов, использованной в экспериментах (а); изображение произвольно выбранного мостика (б)

Fig. 1. Image of the substrate with the counter-pin electrode system used in the experiments (a); image of a randomly selected bridge (b)

и оксид индия являются непрямозонными полупроводниками.

Образцы проводящих структур на основе плотноупакованных наночастиц оксида индия (средний диаметр ≈ 80 нм, продукт Puraterm, CAS #1312-43-2) формировались путем осаждения из водных суспензий с различной объемной долей частиц на подложки со встречно-штыревыми электродными системами (рис. 1, а) с последующим высушиванием. В результате на поверхностях образцов формировались стохастические ансамбли проводящих мостиков, состоящих из плотноупакованных наночастиц и перекрывающих межэлектродные промежутки шириной $l = 44.9 \pm 4.0$ мкм (рис. 1, б). Перед нанесением суспензий на поверхности обезжиренных подложек суспензии сонифицировались в течение 30 мин с целью уменьшения влияния агрегации частиц на формирование проводящих структур на поверхностях подложек.

Выборочный микроскопический и профилометрический анализ ширины и толщины мостиков с использованием оптического микроскопа MX51 (продукт Olimpus) и профилометра Dektak 150 (продукт Veeco) позволил установить, что формируемые In_2O_3 мостики характеризуются усредненными значениями ширины $\langle w \rangle \approx 55$ мкм и толщины $\langle h \rangle \approx 108$ нм. Число мостиков в пределах перекрываемых электродами зон подложек размером 4.26×3.84 мм² оценено примерно рав-

ным 32 (при объемной доле наночастиц в суспензии $\approx 2.1 \cdot 10^{-7}$).

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки по исследованию динамики деградации омической проводимости при длительном воздействии постоянного тока.

В качестве источника постоянного тока I величиной 1 нА использовался программируемый высокостабильный генератор постоянного тока SRS CS-580 от компании Stanford Research Systems (США). Регистрация текущих значений падения напряжения $U(t)$ производилась с помощью компьютеризированной системы сбора данных на основе прибора Agilent 34401A; частота выборки была равна 20 Гц. Предельное значение падения напряжения на образцах было установлено равным 20 В во избежание межэлектродных пробоев при дальнейшем его возрастании. При достижении предельного значения в ходе экспериментов источник тока I переключался из режима стабилизации тока в режим стабилизации напряжения и эксперимент с данным образцом прерывался.

С целью анализа кинетики восстановления ансамблей подвижных носителей заряда в исследуемых структурах, обедняемых в результате деградации омической проводимости при длительном воздействии постоянного тока в ходе экспериментов, осуществлялись три последовательных прогона каждого образца с интервалами

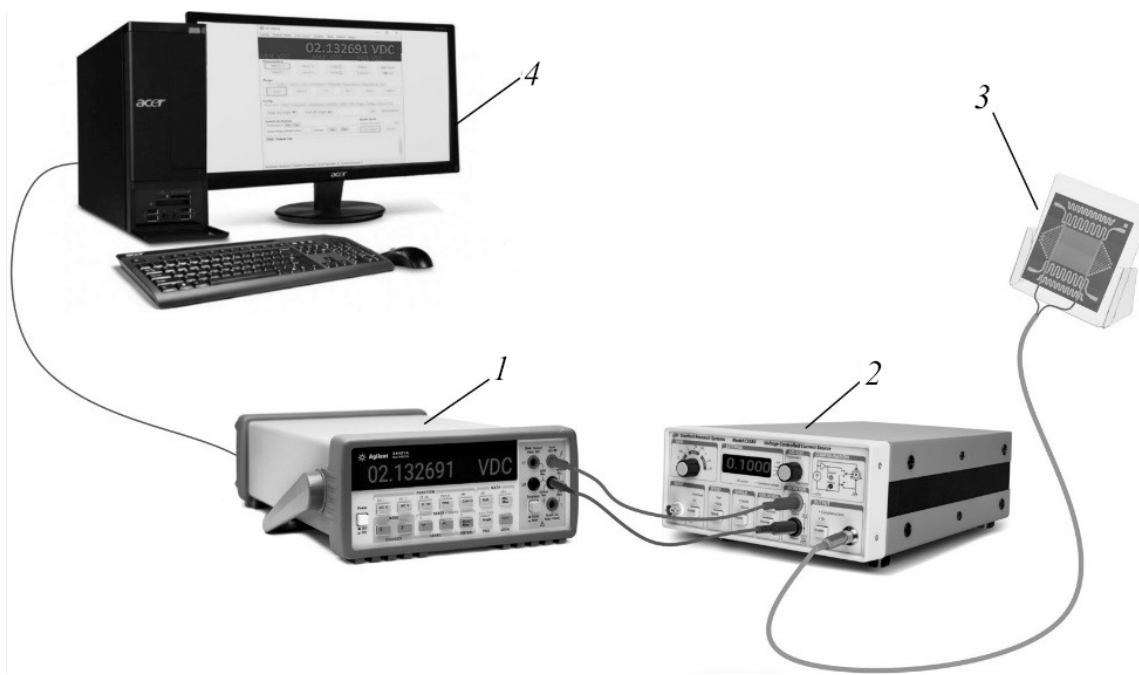


Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения эволюции проводимости в ансамблях межэлектродных мостиков оксида индия: 1 – мультиметр; 2 – источник тока, управляемый напряжением; 3 – исследуемый образец, 4 – персональный компьютер

Fig. 2. Experimental setup for studying the evolution of conductivity in ensembles of indium oxide interelectrode bridges: 1 – multimeter; 2 – voltage-controlled current source; 3 – sample under study; 4 – personal computer

между ними от 0.5 до 1.5 часов. На рис. 3 представлены типичные зависимости $U(t)$, полученные в результате трех последовательных прогонов для одного из образцов.

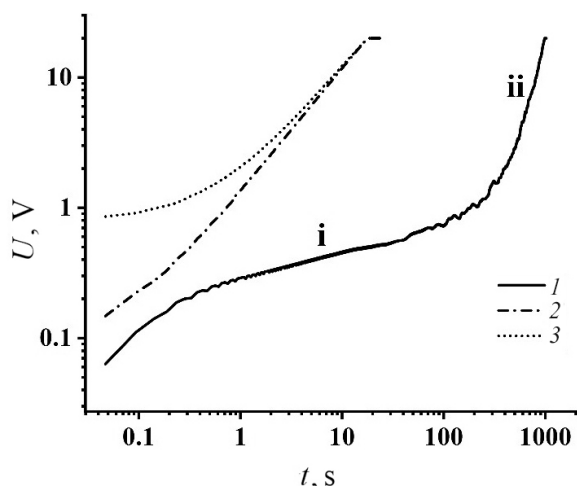


Рис. 3. Эволюция зависимостей $U(t)$ для исследуемого образца при последовательности прогонов (от 1 до 3)

Fig. 3. Evolution of dependencies $U(t)$ for the investigated sample at the sequence of runs (from 1 to 3)

Отметим, что подобное поведение является типичным для всех исследованных образцов, различия между которыми проявляются лишь

в значениях падения напряжения на квазистационарных участках (отмечен как *i* на зависимости 1) и временем достижения предельного значения падения напряжения. С точки зрения анализа деградации омической проводимости наибольший интерес представляет зависимость 1, демонстрирующая квазистационарный режим переноса подвижных носителей заряда на участке *i* с медленным возрастанием падения напряжения вследствие обеднения ансамбля подвижных носителей и достаточно быстрый рост $U(t)$ по мере приближения исследуемой структуры к порогу протекания свободных носителей заряда (стадия *ii*).

Зависимости 2 и 3 (второй и третий прогоны) демонстрируют преимущественно «емкостный» характер проводимости (близкое к линейному быстрое возрастание $U(t)$), свидетельствующий о значительном обеднении ансамбля носителей, т. е. о деградации омической проводимости. Оценки показывают, что во время первого прогона омическая проводимость образца G_{ohm} постепенно убывает от значения порядка $1.7 \cdot 10^{-9}$ См до предельного значения $5.0 \cdot 10^{-10}$ См, определяемого в эксперименте. На рис. 4 представлены зависимости G_{ohm} от времени, восстановленные по описанной в [14] методике и характеризующие



динамику деградации омической проводимости в последовательных прогонах. Стрелки отмечают частичное восстановление проводимости между прогонами.

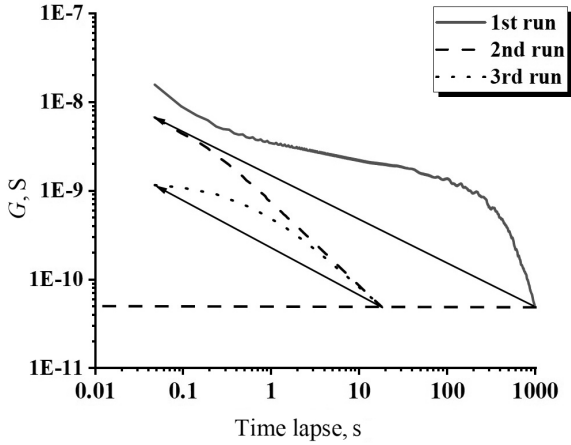


Рис. 4. Дegrадации омической проводимости в последовательности запусков; начальные данные представлены на рис. 3

Fig. 4. Decay of ohmic conductivity in the startup sequence; initial data are shown in Fig. 3

Значительный интерес представляет скейлинговый анализ проводимости исследуемых образцов в критической области (по мере приближения к порогу протекания). Поведение G_{ohm} при этом в зависимости от отстройки управляющего параметра

$$\Delta\eta(t) = [\eta_c - \eta(t)]/\eta_c \quad (1)$$

(например, числа локальных каналов проводимости в объеме образца $\eta(t)$) от критического значения η_c описывается степенной зависимостью (см., например, [15])

$$G(t) \propto [\Delta p(t)]^\alpha, \quad (2)$$

где α – соответствующий критический показатель. В соответствии с многочисленными результатами моделирования [16–19] значение α для трехмерных стохастических проводящих систем близко к 2, а для двумерных – к 1.3. В нашем случае, принимая во внимание взаимосвязь между омической проводимостью образца и падением напряжения на нем в условиях медленных изменений $U(t)$ (т. е. при несущественном вкладе емкостной составляющей в общую проводимость образца), можно записать $U(t) \propto [\Delta p(t)]^\beta$, где $\beta = -\alpha$. В [20] теоретически обоснована и верифицирована в экспериментах методика оценки критического показателя β , базирующаяся на определении наклона зависимости $\bar{U}(t) = f(dU/dt)$

вблизи порога протекания в логарифмических координатах. Значения $\bar{U}(t)$ и dU/dt определяются для трендовой линии, получаемой в результате сглаживания исходной зависимости падения напряжения на образце от времени с помощью скользящего окна во временной области. Ширина окна выбирается из критерия минимального искажения крупномасштабной структуры и максимального подавления флуктуационной составляющей зависимости $U(t)$; для используемой частоты выборки данных (20 Гц) и характерных временен достижения порога протекания в ходе первого прогона порядка от 1000 до 3000 с, приемлемые значения ширины скользящего окна при сглаживании по процедуре составляют от 50 до 300 с. Используемая процедура сглаживания определена в программном пакете Microcal Origin как adjacent averaging и заключается в вычислении средневзвешенной величины по выделяемой окном выборке значений $U(t)$ со следующими весовыми коэффициентами:

$$W_j = 1 - \{(i - j)/[(N + 1)/2]\}^2, \quad (3)$$

где N определяет ширину окна, j – индекс точки, принимающий значения в интервале $j = 0, N - 1$, а индекс i соответствует положению центра окна. Между критическим показателем падения напряжения β и показателем γ аппроксимирующей степенной зависимости $\bar{U}(t) \propto [dU(t)/dt]^\gamma$ вблизи порога протекания существует следующая взаимосвязь: $\beta/(\beta - 1) \approx \gamma$ (следует учитывать, что критический показатель β отрицателен).

На рис. 5 представлены результаты применения этой процедуры к зависимости 1, приведенной на рис. 3; сглаживание было осуществлено скользящим окном, включающим 3001 выборочное значение $U(t)$. По полученной в результате трендовой линии $\bar{U}(t)$ затем вычислялись конечно-разностные отношения $\Delta\bar{U}/\Delta t$ по следующей схеме: диапазон изменения $\bar{U}(t)$ от 5 до 20 В разбивался на равные интервалы по 0.5 В и для каждого интервала определялось время нахождения трендовой линии $\bar{U}(t)$ в его пределах. Разброс полученных данных свидетельствует о неполном подавлении флуктуационной составляющей $U(t)$ в процедуре сглаживания; флуктуации падения напряжения обусловлены стохастичностью ансамбля появляющихся и исчезающих в процессе переноса зарядов локальных проводящих каналов в образце. Тем не менее, полученные данные могут быть использованы для оценки значения γ вблизи порога протекания в исследуемом образце.

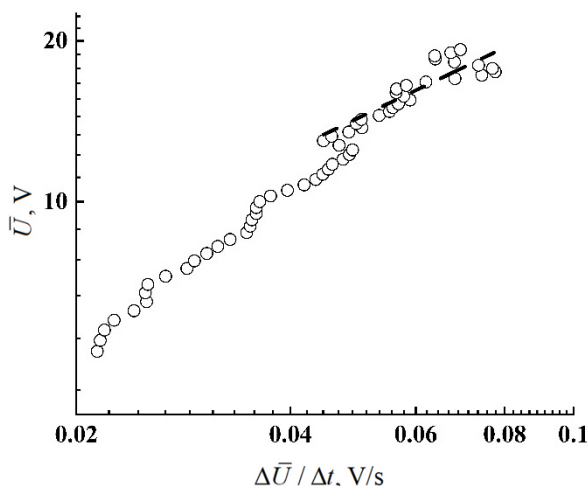


Рис. 5. Значения $\bar{U}(t)$ в зависимости от $\Delta\bar{U}/\Delta t$ на стадии ii для образцов In_2O_3 . Пунктирная линия отмечает степенной тренд в поведении набора данных на стадии ii (см. рис. 3)

Fig. 5. Values $\bar{U}(t)$ as a function of $\Delta\bar{U}/\Delta t$ at stage ii for In_2O_3 samples. The dotted line marks the stepped trend in the behavior of the dataset in stage ii (Fig. 3)

Для построения аппроксимирующей степенной зависимости $\bar{U}(t) \propto \left[\frac{d\bar{U}(t)}{dt} \right]^\gamma$ использовался набор значений $(\Delta\bar{U}/\Delta t, \bar{U})$ в интервале $\bar{U}(t)$ от 13 до 20 В, соответствующем приближению системы к порогу протекания. Аппроксимирующая зависимость, представленная на рис. 5 пунктирной линией, описывается следующим выражением:

$$\bar{U}(t) \approx (97.88 \pm 20.27) \cdot (\Delta\bar{U}/\Delta t)^{(0.64 \pm 0.07)}. \quad (4)$$

Таким образом, критический показатель падения напряжения β (и, соответственно, взятый с обратным знаком критический показатель проводимости α) находится в интервале от ≈ -1.33 до ≈ -2.45 с наиболее вероятным значением ≈ -1.78 . Отметим, что эта величина достаточно близка к полученным ранее значением $\beta \approx -1.597$ для ансамблей проводящих мостиков на основе плотноупакованных наночастиц анатаза [14]. Подобная близость может рассматриваться как подтверждение универсальности наблюдаемого эффекта перехода от полупроводникового к диэлектрическому состоянию в дисперсных системах на основе плотноупакованных наночастиц при длительном воздействии постоянного тока.

2. Численная модель расчета проводимости перколяционной системы

Традиционно проводящие свойства неупорядоченного материала рассматриваются путем

изучения поведения случайных резисторных решеток. В этом случае к неупорядоченному материалу прикладывается напряжение U и измеряется общий ток I через образец, при этом модельная проводимость \tilde{G} образца определяется как константа пропорциональности $I = \tilde{G}U$. Для образца L^d , имеющего длину L вдоль каждой из осей, в d -мерной системе проводимость однородного материала равна

$$\tilde{G} = L^{d-1}\sigma/L = L^{d-2}\sigma, \quad (5)$$

где σ – удельная проводимость образца. В данном случае модельная проводимость \tilde{G} обратно пропорциональна длине образца в направлении потока и пропорциональна площади поперечного сечения $(d-1)$ -мерной площади. Это можно понять, если учесть, что в потоке участвуют L^{d-1} параллельных частей, каждая из которых увеличивает значение модельной проводимости.

Для численного анализа омической проводимости дисперсных полупроводниковых мостиков, состоящих из плотноупакованных наночастиц оксида индия (In_2O_3), удобно рассмотреть двухфазную прямоугольную резисторную структуру с размерами $l \times w \times h$ (рис. 6),

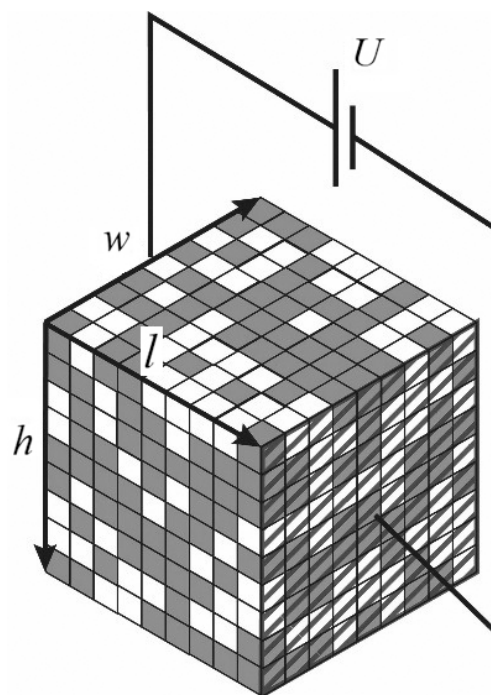


Рис. 6. Возможная конфигурация трехмерной двухфазной перколяционной системы. Левая и правая грани системы подключены к источнику постоянного тока с разностью потенциалов U

Fig. 6. Possible configuration of a three-dimensional two-phase percolation system. The left and right edges of the system are connected to a DC source with potential difference U



где l , w и h – длина, ширина и толщина структуры соответственно. Структура равномерно и случайным образом заполнена проводящими и изолирующими узлами с плотностями заполнения p и $(1 - p)$ соответственно. В качестве граничных условий можно принять, что потенциалы в каждой из точек левой и правой грани структуры заранее известны. Таким образом, эффективная проводимость равна интегральному току, протекающему через систему.

Численное значение напряжения в каждом узле и тока в каждом звене рассчитываются путем решения уравнений Кирхгофа. В соответствии с законом сохранения тока можно прийти к следующему уравнению:

$$\sum_{l,m,n} (U_{lmn} - U_{ijk}) \tilde{G}_{lmn}^{ijk} = 0, \quad (6)$$

где (l, m, n) – ближайший соседний узел узла (i, j, k) , \tilde{G}_{lmn}^{ijk} – модельная проводимость связи между ними.

Для решеточной модели двухфазной системы модельная локальная омическая проводимость \tilde{G}_{lmn}^{ijk} , отнесенная к паре смежных узлов, есть

$$\begin{pmatrix} \phi_{xyz} & -\psi_y & -\xi_x & 0 & -\mu_z & 0 & 0 & 0 \\ -\psi_y & \phi_{xyz} & 0 & -\xi_x & 0 & -\mu_z & 0 & 0 \\ -\xi_x & 0 & \phi_{xyz} & -\psi_y & 0 & 0 & -\mu_z & 0 \\ 0 & -\xi_x & -\psi_y & \phi_{xyz} & 0 & 0 & 0 & -\mu_z \\ -\mu_z & 0 & 0 & 0 & \phi_{xyz} & -\psi_y & -\xi_x & 0 \\ 0 & -\mu_z & 0 & 0 & -\psi_y & \phi_{xyz} & 0 & -\xi_x \\ 0 & 0 & -\mu_z & 0 & -\xi_x & 0 & \phi_{xyz} & -\psi_y \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_z & 0 & -\xi_x & -\psi_y & \phi_{xyz} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \\ B_3 \\ B_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $B_{1,2,3,4} = 1$ в силу граничных условий задачи. Элементы ξ_x , ψ_y , μ_z матрицы A характеризуются проводимостям соседних звеньев вдоль каждого из трех соответствующих направлений. Элементы главной диагонали ϕ_{xyz} представляют собой комбинацию проводимостей соседних звеньев. Данный метод позволяет получить точные решения как для проводимости, так и для поля или распределения тока в структуре.

Вблизи порога протекания средняя эффективная модельная омическая проводимость имеет вид степенного закона с модельной экспонентой $\tilde{\alpha}(h)$:

$$\langle \tilde{G} \rangle \approx (p - p_c)^{\tilde{\alpha}}. \quad (10)$$

$$\tilde{G}_{lmn}^{ijk} = \bar{G} g_{lmn}^{ijk}, \quad (7)$$

$$g_{lmn}^{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{узел } ijk \text{ и } lmn \\ & \text{принадлежит проводящей фазе,} \\ 0, & \text{узел } ijk \text{ или } lmn \\ & \text{принадлежит непроводящей фазе,} \end{cases}$$

где $\bar{G} = \text{const}$.

Для узлов, связанных с левой и правой гранями структуры, потенциалы U_{lmn} принимают значения 1 и 0 соответственно. Таким образом, имеем N уравнений ($N = (N_l - 2) \times N_w \times N_h$) для N неизвестных потенциалов. Уравнение (6) можно записать в матричной форме в виде

$$A \cdot \vec{X} = \vec{B}, \quad (8)$$

где A – разреженная симметричная матрица, \vec{X} – вектор из N компонент, соответствующих неизвестным потенциалам поля. Вектор правой части \vec{B} имеет длину N и состоит из нулевых значений, за исключением краевых элементов, на которые наложено граничное условие (в данном случае в виде потенциала левой грани, равного 1 В).

В качестве примера для структуры с размерами $l \times w \times h = 4 \times 2 \times 2$ уравнение (8) можно записать в виде:

В данном случае введение критического показателя $\tilde{\alpha}(h)$ обусловлено степенным характером зависимости модельной проводимости $\langle \tilde{G} \rangle$ от параметра отстройки $(p - p_c)$ вблизи порога протекания. Здесь символ $\langle \rangle$ выражает среднее по величине значение. Сравнивая формулу (10) с формулой (2), можно видеть, что роль критического параметра η_c в данной модели соответствует количеству открытых узлов, тогда параметр $\tilde{\alpha}$ аналогичен параметру α . Поскольку изучаемые системы имеют конечный размер, ожидается, что эффективная проводимость не будет усредняться вблизи порога протекания, когда длина корреляции больше размера системы. Та-



ким образом, вблизи порога протекания самый большой кластер состоит в основном из критических связей, а проводимость пропорциональна числу таких связей.

Для исследования влияния толщины на порог протекания и экспоненту проводимости композитов металл-изолятор была использована численная модель резистивной структуры. Эффективная проводимость усреднялась по 100 образцам, что оказалось достаточным с точки зрения качества решения. Рассматривался широкий диапазон толщин $-h/(l \times w) \in [2.5 \cdot 10^{-5}; 10^{-2}]$, что позволило изучить переход от двумерной к трехмерной перколяционной структуре. На рис. 7, а, б представлены найденные экспериментально нормированные омические проводимости $\tilde{G}(p)/\tilde{G}_0$ резисторных решеток квадратного сечения, где \tilde{G}_0 – модельная проводимость сети заданной размерности при $p = 1$. Стороны сечения каждой из решеток имели по 100 узлов, в то время как толщина решеток h принимала значение 1, 2, 3 и 100 соответственно. На рис. 7, б приведены расчетные значения порога протекания в зависимости от толщины слоя. Полученные результаты характеризуют переход от двумерной перколяционной системы к трехмерной. Значение порога протекания вычислялось путем аппроксимации усредненного значения модельной нормирован-

ной проводимости функцией

$$\frac{\tilde{G}(p)}{\tilde{G}_0} = \left(\frac{p - p_c}{1 - p_c} \right)^{\tilde{\alpha}}. \quad (11)$$

Для определения порога перколяции использовались данные, представленные на рис. 7, а. Эффект насыщения для трехмерных структур наблюдается при $h/l \geq 0.1$, что соответствует размерам системы, превышающим конечный размер длины корреляции.

Методика оценки модельного критического показателя $\tilde{\alpha}$ базировалась на определении наклона кривой зависимости (10) вблизи порога протекания в логарифмических координатах. В результате проведенных исследований (рис. 7, 8) выявлено, что незначительное увеличение толщины квазидвумерной структуры приводит к резкому снижению порога протекания, а также к возрастанию модельного критического показателя. Для $h/(l \times w) > 1.3 \cdot 10^{-3}$ проводимость имеет трехмерное поведение, поскольку порог протекания и экспонента проводимости насыщаются. Линейная зависимость экспоненты проводимости от толщины может быть использована для оценки толщины металл-изолятор. На основе этих оценок и данных микроскопического и профилометрического анализа исследуемая система может быть рассмотрена как переходная между двумерной и трехмерной проводящей матрицей.

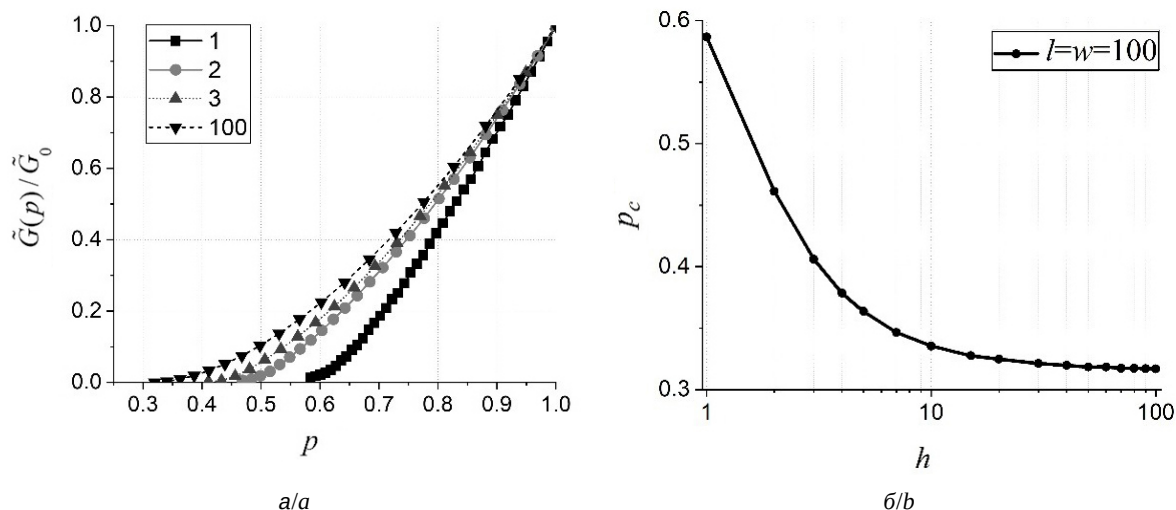


Рис. 7. Результаты численного моделирования для решетки квадратного сечения ($l = w = 100$): а – зависимость нормированной модельной омической проводимости решетки для различных значений толщины структуры h ; б – зависимость порога протекания p_c от величины толщины структуры h

Fig. 7. Results of numerical modeling for a lattice of square cross-section ($l = w = 100$): а – dependence of the normalized model lattice ohmic conductivity for different values of the structure thickness h ; б – dependence of the percolation threshold p_c on the value of the structure thickness h

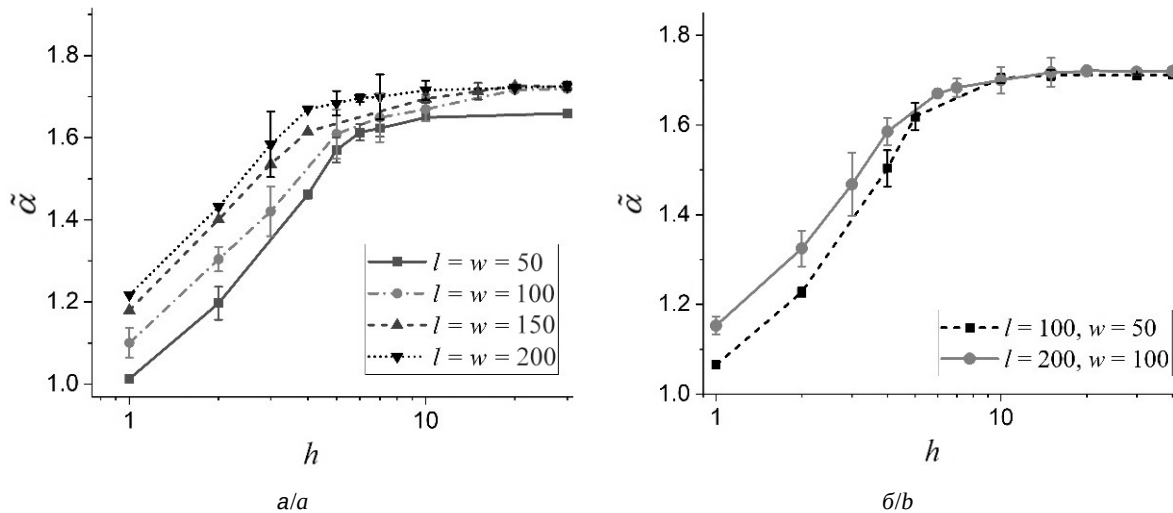


Рис. 8. Зависимость модельного критического показателя проводимости $\tilde{\alpha}$ от толщины структуры h : а – для решеток квадратного сечения; б – для решеток прямоугольного сечения

Fig. 8. Dependence of the model critical conductivity index $\tilde{\alpha}$ on the structure thickness h : а – for lattices of square cross-section; б – for lattices of rectangular cross-section

Заключение

Одними из главных наблюдаемых особенностей переноса электрона в мостовых неупорядоченных ансамблях наночастиц исследуемых систем является достижение порога протекания при длительном воздействии постоянного тока и крайне низкая скорость восстановления ухудшенной проводимости после снятия воздействия. Эти особенности могут быть интерпретированы как проявление перехода «полупроводник – диэлектрик» в таких структурах и обусловлены обеднением ансамблей электронов проводимости, захваченных в процессе переноса через структуру глубокими ловушками в наночастицах оксида индия. Этот переход проявляется в ограниченных диапазонах числа мостов и их средней ширины, определяющих полное сечение проводящей структуры. Установленное значение критического показателя проводимости для исследованных структур имеет промежуточное значение между теоретическими оценками для трехмерных и двумерных перколяционных систем, что позволяет рассматривать исследуемые структуры как переходные между двумерными и трехмерными системами, что подтверждается профилометрическим и микроскопическим анализом структуры исследуемого образца.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве физической основы при разработке новых подходов к созданию тонких структур с ограниченной проводимостью.

Список литературы/References

1. Witkiewicz Z., Jasek K., Grabka M. Semiconductor gas sensors for detecting chemical warfare agents and their simulants. *Sensors*, 2023, vol. 23, iss. 6, article no. 3272. <https://doi.org/10.3390/s23063272>
2. Qin Q., Olimov D., Yin L. Semiconductor-type gas sensors based on $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles and its derivatives in conjunction with SnO_2 and graphene. *Chemosensors*, 2022, vol. 10, iss. 7, article no. 267. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10070267>
3. Sharma A., Ahmed A., Singh A., Oruganti S. K., Khosla A., Arya S. Review—Recent advances in tin oxide nanomaterials as electrochemical/chemiresistive sensors. *J. Electrochem. Soc.*, 2021, vol. 168, iss. 2, pp. 027505. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abdee8>
4. Chen N., Deng D., Li Y., Xing X., Liu X., Xiao X., Wang Y. The xylene sensing performance of WO_3 decorated anatase TiO_2 nanoparticles as a sensing material for a gas sensor at a low operating temperature. *RSC Adv*, 2016, vol. 6, iss. 55, pp. 49692–49701. <https://doi.org/C6RA09195D>
5. Feiyu D., Wang Y. Transition metal oxide nanostructures: Premeditated fabrication and applications in electronic and photonic devices. *J. Mater. Sci.*, 2018, vol. 53, iss. 6, pp. 4334–4359. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1862-3>
6. Sudarshan S., Das S., Ray S. K. Progress in group-IV semiconductor nanowires based photonic devices. *Appl. Phys. A*, 2023, vol. 129, iss. 3, article no. 216. <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06483-7>
7. Baldini E., Palmieri T., Pomarico E. Auböck G., Chergui M. Clocking the ultrafast electron cooling in anatase titanium dioxide nanoparticles. *ACS Photonics*, 2018, vol. 5, iss. 4, pp. 1241–1249. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.7b00945>



8. Song Y., You K., Chen Y., Zhao J., Jiang X., Ge Y., Wang Y., Zheng J., Xing C., Zhang H. Lead monoxide: A promising two-dimensional layered material for applications in nonlinear photonics in the infrared band. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, iss. 26, pp. 12595–12602. <https://doi.org/10.1039/c9nr03167g>
9. Li J., Chen C., Liu S., Lu J., Goh W. P., Fang H., Qiu Z., Tian B., Chen Z., Yao C., Liu W., Yan H., Yu Y., Wang D., Wang Y., Lin M., Su Ch., Lu J. Ultrafast electrochemical expansion of black phosphorus toward high-yield synthesis of few-layer phosphorene. *Chem. Mater.*, 2018, vol. 30, iss. 8, pp. 2742–2749. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00521>
10. Terna A. D., Elemike E. E., Mbonu J. I., Osafire O. E., Ezeani R. O. The future of semiconductors nanoparticles: Synthesis, properties and applications. *Mater. Sci. Eng. B*, 2021, vol. 272, iss. 2, pp. 115363. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115363>
11. Collins G., Lonergan A., McNulty D., Glynn C., Buckley D., Hu C., O'Dwyer C. Semiconducting metal oxide photonic crystal plasmonic photocatalysts. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020, vol. 7, iss. 2, pp. 1901805. <https://doi.org/10.1002/admi.201901805>
12. Morris A. J., Monserrat B. Optical absorption driven by dynamical symmetry breaking in indium oxide. *Phys. Rev. B*, 2018, vol. 98, iss. 16, pp. 161203(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.161203>
13. Schmidt-Grund R., Krauß H., Kranert C., Bonholzer M., Grundmann M. Temperature dependence of the dielectric function in the spectral range (0.5–8.5) eV of an In₂O₃ thin film. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, iss. 11, pp. 111906. <https://doi.org/10.1063/1.4896321>
14. Zimnyakov D. A., Volchkov S. S., Vasilkov M. Y., Plugin I. A., Varezchnikov A. S., Gorshkov N. V., Ushakov A. V., Tokarev A. S., Tsy-pin D. V., Vereshagin D. A. Semiconductor-to-Insulator Transition in Inter-Electrode Bridge-like Ensembles of Anatase Nanoparticles under a Long-Term Action of the Direct Current. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, iss. 9, article no. 1490. <https://doi.org/10.3390/nano13091490>
15. Gallyamov S. R., Mel'chukov S. A. Percolation model of conductivity of two-phase lattice: Theory and computer experiment. *Vestn. Udmurtsk. Univ. Mat. Mekh. Komp. Nauki*, 2010, no. 4, pp. 112–122 (in Russian). <https://doi.org/10.20537/vm100413>
16. Gingold D. B., Lobb C. J. Percolative conduction in three dimensions. *Phys. Rev. B*, 1990, vol. 42, iss. 13, pp. 8220–8224. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.8220>
17. Normand J.-M., Herrmann H. J. Precise determination of the conductivity exponent of 3D percolation using “Percola”. *International Journal of Modern Phys.*, 1996, vol. 6, iss. 6, pp. 813–817. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cond-mat/9602081>
18. Clerc J.-M., Podolskiy V. A., Sarychev A. K. Precise determination of the conductivity exponent of 3D percolation using exact numerical renormalization. *The European Phys. J. B*, 2000, vol. 15, iss. 3, pp. 507–516. <https://doi.org/10.1007/s100510051153>
19. Kozlov B., Laguës M. Universality of 3D percolation exponents and first-order corrections to scaling for conductivity exponents. *Physica A*, 2010, vol. 389, iss. 23, pp. 5339–5346. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.08.002>
20. Zekri L., Kaiss A., Clerc J.-P., Porterie B., Nouredine Z. 2D-to-3D percolation crossover of metal–insulator composites. *Phys. Lett. A*, 2011, vol. 375, iss. 3, pp. 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2010.11.043>

Поступила в редакцию 28.10.2023; одобрена после рецензирования 10.12.2023; принята к публикации 20.12.2023
The article was submitted 28.10.2023; approved after reviewing 10.12.2023; accepted for publication 20.12.2023



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 52–61

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 52–61

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-52-61>, EDN: FNPWQU

Научная статья

УДК 621.9.047/048

Оценка смачиваемости наполнителя связующим в процессе изготовления препрега с воздействием ультразвука для трехмерной печати филаментами, армированными непрерывным углеродным волокном



И. В. Злобина^{1,2}, Н. В. Бекренев¹✉, Д. О. Чуриков¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²НИЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Злобина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, ¹доцент кафедры технической механики и мехатроники; ²научный сотрудник лаборатории специального органического синтеза отдела тонких органических технологий, zlobinaiv@sstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>

Бекренев Николай Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технической механики и мехатроники, nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>

Чуриков Данила Олегович, студент, danilachurikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7389-9419>

Аннотация. На основе изучения результатов процесса пропитки с воздействием ультразвука жгута углеродных волокон эпоксидной смолой с отвердителем полиэтиленполиамин при изготовлении полуфабриката филаментов – термопластичных нитей, использующихся в аддитивных технологиях печати композиционными материалами, установлено существенное улучшение смачиваемости волокон связующим, проявляющееся в уменьшении краевого угла смачивания с 70–77° до 35–40°, что свидетельствует о возможности более полной и равномерной пропитки жгута и, соответственно, о лучшем перераспределении внешних нагрузок между матрицей и наполнителем как в пределах монослоя, так и всего изделия за счет включения в работу максимального числа волокон. С использованием уравнения Юнга – Дюпре рассчитана работа адгезии связующего к волокну и показано, что воздействие ультразвука в процессе пропитки волокон способствует повышению работы адгезии в среднем на 39.7%, что наряду с упомянутым выше улучшением равномерности пропитки может значительно повысить прочность изделий, напечатанных композиционными филаментами, армированными непрерывным углеродным волокном.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композиционные материалы, полуфабрикат филамента, армированный непрерывным углеродным волокном, терморезактивное и термопластичное связующее, смачивание, адгезия, ультразвук

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00039).

Для цитирования: Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О. Оценка смачиваемости наполнителя связующим в процессе изготовления препрега с воздействием ультразвука для трехмерной печати филаментами, армированными непрерывным углеродным волокном // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 52–61. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-52-61>, EDN: FNPWQU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Evaluation of the wettability of the filler binder during the manufacture of prepreg with ultrasound exposure for three-dimensional printing filaments reinforced with continuous carbon fiber

I. V. Zlobina^{1,2}, N. V. Bekrenev¹✉, D. O. Churikov¹

¹Yury Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytechnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

²National Research Centre “Kurchatov Institute”, 1 Academician Kurchatov Square, Moscow 123182, Russia

Irina V. Zlobina, irinka_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>

Nikolaj V. Bekrenev, nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>

Danila O. Churikov, danilachurikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7389-9419>

Abstract. Background and Objectives: The aim of the research is to study the effect of ultrasound on the wettability of carbon fibers with a thermosetting binder and to determine the work of adhesion in the binder-fiber contact as part of the filament prepreg for additive technologies. **Materials and Methods:** Carbon fibers and carbon fiber roving with a width of 2 mm GG-200P were used in the research. Impregnation was carried out with ED-20 epoxy resin with a PEP hardener by pulling a harness at a speed of 10 mm/s through a gap of 2-3 mm between the end



of the ultrasonic concentrator and the lower surface of the container with a binder. In total, 5 control and 5 experimental samples with a length of 300 mm were impregnated. Ultrasonic processing of samples was carried out on an experimental ultrasonic installation with an experimental ultrasonic generator controlled from a laptop and providing a discreteness of 10 Hz adjustment. The impregnation was carried out at a resonant frequency of 21650 Hz and an oscillation amplitude of the output end of the concentrator – 15 microns. The diameter of the output part of the concentrator was 14 mm, respectively, the length of the fiber bundle section was the same size at each time. After curing of the binder, the surface of the fibers was studied using a digital microscope Bresser LCD 50x–2000x at magnification x40 and x300. When impregnating control samples, the ultrasonic transducer of the installation was not included. Microphotographs were used to evaluate the wettability of the fibers with a binder under the influence of ultrasound and without ultrasound, and also to determine the edge angle of wetting and then – according to the Young – Dupree equation – the adhesion of the binder to the fiber surface. **Results:** The control bundle of carbon fibers is characterized by incomplete consolidation of fibers into a bundle, there are separate disoriented fibers, as well as separately existing conglomerates of fibers. Experimental bundles impregnated under the influence of ultrasound are monolithic structures with a continuous filling with a binder. At the same time, areas with inflows of the cured binder that violate the geometric shape of the prepreg are noted. Both control and experimental samples of harness are generally fully impregnated consolidated prepregs, there are no individual fibers or groups of fibers, which may be due to the initially regular structure of harness compared to randomly organized individual fibers into a thread. At the same time, in the control samples, the binder is unevenly distributed over the surface, individual inflows are noted, which indicates an insufficiently uniform impregnation of the harness, which is not observed on the prototypes. By calculating the adhesion performance for control and experimental samples using the experimentally obtained values of the wetting angle, it was found that its value is 44.71–48.98 mJ/m² and 64.46–66.4 mJ/m², respectively, for control and experimental samples. **Conclusion:** A significant improvement in the wettability of the fibers with a binder has been found, manifested in a decrease in the wetting edge angle from 70–77° to 35–40°. Using the Young – Dupree equation, the adhesion of the binder to the fiber has been calculated and it has been shown that the effect of ultrasound during the impregnation of fibers increases the adhesion by an average of 39.7%. **Keywords:** additive technologies, composite materials, prepreg reinforced with continuous carbon fiber, thermosetting and thermoplastic binder, wetting, adhesion, ultrasound

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-00039).

For citation: Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O. Evaluation of the wettability of the filler binder during the manufacture of prepreg with ultrasound exposure for three-dimensional printing filaments reinforced with continuous carbon fiber. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 52–61 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-52-61>, EDN: FNPWQU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Особенностью развития высокотехнологичных производств в ближней и отдаленной перспективе является переход к «Индустрии 4.0», которая характеризуется реализацией принципов прямого цифрового производства при проектировании и изготовлении изделий самой широкой номенклатуры, в том числе по индивидуальным заказам, что предполагает быстрое и гибкое реагирование на меняющиеся запросы рынка. Аддитивные технологии (3D печать) в наибольшей степени отвечают указанным условиям. Наиболее распространенным методом 3D печати является метод послойного наплавления – построение объекта из расплавленных слоев нитей (филаментов) (технология FDM – Fused Deposition Modeling). Разработанные технологии позволяют создавать изделия практически любой формы и плотности, а также самого различного назначения [1].

Тем не менее, весьма актуальной проблемой является недостаточная прочность и выносимость изделий особенно из полимеров, получаемых путем 3D печати, что сдерживает их применение в основном производстве динамических технических систем, к которым относятся наземные, водные и воздушные транспортные средства.

Согласно данным аналитического обзора группы «Деловой профиль» среди причин,

сдерживающих распространение аддитивных технологий в основном производстве, до 31% приходится на ненадежность сформированных изделий [2].

Это обуславливает актуальность разработки новых аддитивных технологий изготовления изделий из полимеров и подготовки строительных материалов.

Постановка задачи

Для развития аддитивных технологий печати полимерными материалами с целью расширения возможности применения изделий в конструкциях основного производства одним из перспективных направлений является разработка технологических методов трехмерной печати композиционными материалами и технологий изготовления композиционных филаментов. Это связано с тем, что полимерные композиционные материалы (ПКМ) отличаются высокими удельной прочностью и коррозионной стойкостью по сравнению с известными металлами и сплавами, а также однокомпонентными полимерами [3, 4].

Введение в структуру объекта трехмерной печати армирующего наполнителя способствует значительному повышению физико-механических характеристик изделия. При этом армирующий наполнитель для наибольшей эффективно-



сти реализации своих функциональных свойств и облегчения прохождения через экструдер печатающей головки принтера представляет собой не моноволокна, которые имеют толщину, как правило, в пределах 0.01–0.02 мм, а жгут из волокон. Однако в этом случае приобретает особую важность эффективная пропитка жгута связующим для образования полуфабриката (наполнитель, пропитанный не отвержденным окончательно связующим) с целью обеспечения совместной работы всех волокон при восприятии внешней нагрузки. Известны два подхода к формированию таких пропитанных связующим полуфабрикатов: с однокомпонентным термопластичным связующим и с двухкомпонентным связующим, когда первичный жгут волокон пропитывают реактопластом, а затем снаружи покрывают термопластичным полимером. Первый метод, очевидно, более прост в реализации, однако не обеспечивает качественной пропитки по причине высокой вязкости термопластов и неудовлетворительной смачиваемости ими поверхности волокон. Для решения данной проблемы компанией Anisoprint предложена технология коэкструзии, согласно которой жгут из непрерывных волокон предварительно пропитывают термореактивной смолой, а затем покрывают внешним слоем термопластичного полимера, который в процессе печати обеспечивает объединение отдельных нитей в слои, а последних – в изделие. Однако данная технология имеет существенный недостаток, заключающийся в разнородности теплофизических и механических свойств термореактивного связующего для полуфабриката и термопластичного для формируемого изделия, что снижает адгезию между слоями, а также может привести к возникновению внутренних напряжений в процессе остывания при выходе из фильеры печатающей головки и на платформе построения в составе монослоя и деструкции связующего в монослоях при определенной температуре эксплуатации [5–11].

Исследования по повышению физико-механических свойств ПКМ, сформированных при помощи аддитивных технологий, проводятся в различных направлениях. При этом наиболее эффективным методом в настоящее время считается физическая модификация, в том числе путем воздействия на материал волновых процессов различного частотного диапазона [12–14], например ультразвукового. Известны работы и изобретения, демонстрирующие повышение качества пропитки ПКМ термопластичными полимерами при

воздействии ультразвука на рабочую зону, переходящими в текучее состояние под действием высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний [15–22]. В то же время не рассматривалось влияние ультразвука на процесс пропитки жгутов для армирования филаментов для трехмерной печати, не оценивалось смачивание связующим отдельных волокон в жгуте, а также изменение работы адгезии на границе «связующее – волокно» в филаментах, которое объективно может оказать положительное влияние на прочность как монослоя, напечатанного из композитных полуфабрикатов, так и объекта трехмерной печати в целом.

В соответствии с изложенным целью исследований явилось изучение влияния ультразвука на смачиваемость углеродных волокон термореактивным связующим и определение работы адгезии в контакте «связующее – волокно» в составе полуфабриката филамента для аддитивной технологии FDM.

Методика исследований

В исследованиях использованы углеродные волокна ООО «Балаково Карбон Продакшн» (Россия, Саратовская обл., г. Балаково) и жгуты из углеродных волокон шириной 2 мм GG-200P производства Mikrotex Composites. Пропитку осуществляли эпоксидной смолой ЭД-20 (ООО «База КЛАСС», Россия, Ростовская область, хут. Старая Станица) с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА) в соотношении (10 : 1) [23] путем протягивания жгута, при комнатной температуре +25°C, со скоростью 10 мм/с через зазор 2–3 мм между торцом ультразвукового концентратора и нижней поверхностью емкости со связующим. Всего пропитывали по 5 контрольных и 5 опытных образцов длиной 300 мм.

Ультразвуковую обработку образцов осуществляли на лабораторной ультразвуковой установке (рис. 1, а) с экспериментальным ультразвуковым генератором (рис. 1, б), управляемым от ноутбука и обеспечивающим дискретность регулировки 10 Гц, что обеспечивает точную настройку системы в резонанс. Пропитку осуществляли при резонансной частоте 21650 Гц и амплитуде колебаний выходного торца концентратора 15 мкм. Диаметр выходной части концентратора равнялся 14 мм, соответственно такого же размера была длина участка жгута волокон в каждый момент времени. После отверждения связующего поверхность волокон изучали при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD



a/a



б/б

Рис. 1. Лабораторная ультразвуковая установка (а) и ультразвуковой генератор (б) (цвет онлайн)

Fig. 1. Laboratory ultrasonic installation (a) and ultrasonic generator (b) (color online)

50х–2000х (BRESSLER, Германия) при увеличении х40 и х300. При пропитке контрольных образцов ультразвуковой преобразователь установки не включали.

По полученным микрофотографиям оценивали качественно смачиваемость волокон связующим при воздействии ультразвука и без ультразвука, а также определяли краевой угол смачивания и далее по уравнению Юнга – Дюпре – работу адгезии связующего к поверхности волокна: $W_{аконтр}$ и $W_{аопыт}$ – для контрольных и опытных образцов соответственно.

Результаты и их обсуждение

Как известно, формирование композита сопровождается механическим или физико-химическим взаимодействием компонентов, находящихся в различных агрегатных состояниях: связующее, как правило, – вязко-текучая жидкость, наполнитель – твердое тело. Это приводит в процессе отверждения связующего к образованию фаз и границ раздела между ними, которые в значительной мере определяют свойства сформированного материала. Межфазное взаимодействие компонентов в композиционных материалах зависит от их термодинамической, кинетической и механической совместимости [24, 25]. В результате композит становится единым материалом,

в котором компоненты соединены механическими, физическими и химическими связями.

В реальных условиях вследствие несовершенства структуры материалов, сложности микрорельефа поверхности армирующих элементов реализуется комплексное физико-химическое взаимодействие компонентов. Оно происходит в процессе смачивания армирующих элементов связующим. Мерой смачивания обычно служит краевой угол θ между смачиваемой поверхностью твердого тела и касательной к поверхности жидкости, в нашем случае связующего, на границе смачивания, косинус которого связан с поверхностным натяжением на границах раздела жидкость – газ, твердое тело – жидкость и твердое тело – газ.

В работе смачивание наполнителя жидким связующим оценивали по внешнему виду отвержденных полуфабрикатов (рис. 2, 3) и путем определения угла θ на основе микрофотографий областей контакта волокон со связующим (рис. 4). В первом случае наличие избыточного связующего на поверхности считали следствием недостаточного смачивания и, соответственно, неполной пропитки жгута волокон.

На основе анализа рис. 2 и рис. 3 отмечается следующее. Для контрольных углеродных волокон характерно неполное объединение волокон в полуфабрикат филамента, присутствуют



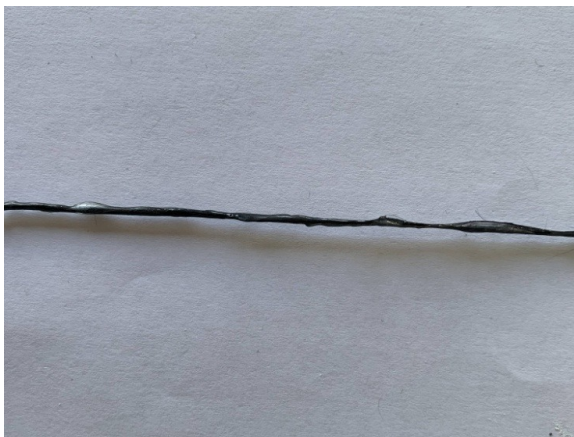
a/a



б/б

Рис. 2. Внешний вид контрольного (а) и опытного (б) образцов углеродных волокон после пропитки смолой ЭД-20 (цвет онлайн)

Fig. 2. Appearance of the control (a) and experimental (b) samples of carbon fiber harness after impregnation with ED-20 resin (color online)



a/a



б/б

Рис. 3. Внешний вид контрольного (а) и опытного (б) образцов предварительно скрученных жгутов углеродных волокон после пропитки смолой ЭД-20 (цвет онлайн)

Fig. 3. Appearance of the control (a) and experimental (b) carbon roving samples after impregnation with ED-20 resin (color online)

отдельные разориентированные волокна, а также существующие раздельно объединения волокон (см. рис. 2, а). Опытные углеродные волокна, пропитанные при воздействии ультразвука, представляют собой монолитные структуры со сплошным заполнением связующим (объективно все волокна объединены в полуфабрикат). При этом отмечаются участки с наплывами отвержденного связующего, нарушающие геометрическую форму полуфабриката (рис. 2, б). Как контрольные, так и опытные образцы предварительно скрученных жгутов представляют собой в целом полностью пропитанные объединенные полуфабрикаты, отдельные волокна или группы волокон отсутствуют, что может быть связано с изначально-

но регулярной структурой жгутов по сравнению со случайно организованными в нить отдельными волокнами. В то же время в контрольных образцах связующее распределено по поверхности неравномерно, отмечаются отдельные наплывы, что свидетельствует о недостаточно равномерной пропитке жгутов (рис. 3, а). На опытных образцах наплывы связующего не выявлены, что может свидетельствовать о его полном проникновении в жгут (рис. 3, б).

В процессе контакта отдельных волокон и групп волокон жгута со связующим последнее частично проникает в структуру жгута, частично сохраняется на его периферии в виде отдельных капель и их агломератов. Это дает возможность

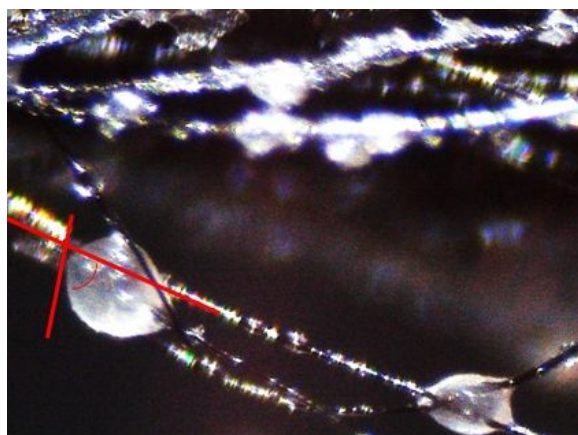


оценить смачиваемость волокон в реальных, а не в модельных (на плоской поверхности или волокне по методу «сидячей капли» [24]) условиях, хотя в этом случае возможны определенные погрешности в определении краевого угла смачивания (см. рис. 4).

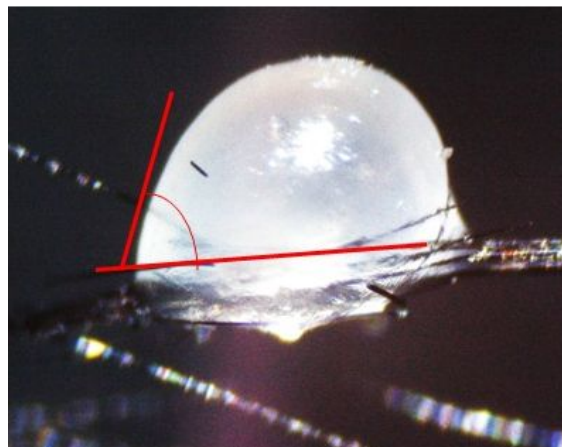
На основе анализа микрофотографий контрольных образцов установлено, что они характеризуются наличием сферообразных капель различного размера (от 0.05 до 0.3 мм) на группе волокон или на единичном волокне. Капли разделены промежутком или связаны тонкими слоями смолы, так что волокна напоминают бусы (см. рис. 4, а). При этом растекание капель по волокнам не выявлено а краевой угол смачивания равен $70\text{--}77^\circ$, т. е. является острым ($0^\circ < \theta < 90^\circ$), что свидетельствует о смачивании поверхности волокон связующим [24–26]. В то же время угол достаточно велик, что объясняется значительным

поверхностным натяжением эпоксидной смолы и близостью его значения к средней поверхностной энергии углеродного волокна (36.5 мН/м и 38.8 мДж/м² соответственно) [27–29]. Значительная величина угла θ показывает, что пропитка углеродных волокон и жгута эпоксидной смолой ЭД-20 в обычных условиях может иметь ограниченный характер, что визуально проявляется на внешнем виде отвержденных полуфабрикатов (см. рис. 2, а и рис. 3, а).

На волокнах и их объединениях в опытных образцах отмечаются капли в виде шарового сегмента, объединяющие группу волокон, или слившиеся в относительно толстый слой на единичном волокне. Встречаются единичные сферообразные капли. Краевой угол смачивания равен $35\text{--}40^\circ$, т. е. является в 1.9–2 раза более острым, чем в контрольных образцах (см. рис. 4, б). Снижение величины угла θ свидетельствует о лучшем рас-



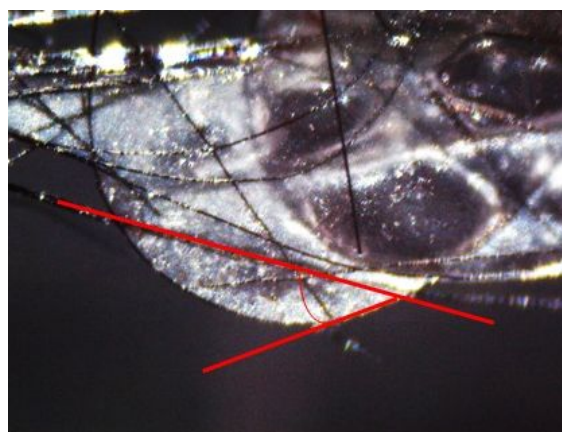
а/а



б/б



в/в



г/г

Рис. 4. К определению краевого угла смачивания углеродных волокон в полуфабрикате филамента: капли связующего на поверхности отдельных волокон контрольного (а, б) и опытного (в, г) образцов. Увеличение $\times 300$ (цвет онлайн)

Fig. 4. To determine the edge angle of wetting of carbon fibers in the prepreg: Drops of binder on the surface of individual fibers of the control (a, b) and experimental (c, d) samples. Magnification $\times 300$ (color online)



текании каплей связующего по волокнам и определяет большую степень пропитки жгута, что соответствует относительно однородной морфологии поверхности и отсутствию на ней местных натеков связующего (см. рис. 2, б и рис. 3, б).

В поле ультразвуковых колебаний на границе раздела «связующие – наполнитель» происходит известное из физики ультразвука явление усиления капиллярного эффекта [19, 21, 29, 30]. Одной из его причин является уменьшение поверхностного натяжения жидкости, приводящее к усилению смачивания стенок капилляра и течению жидкости по нему. Одновременно вследствие кавитационных процессов наблюдается активация поверхности наполнителя, что повышает уровень контактного взаимодействия капли с субстратом. В нашем случае аналогами капилляров являются узкие (в десятые и сотые доли миллиметра) промежутки между отдельными волокнами, в которых активизируются акустические течения и капиллярные процессы. Видимым следствием этого становится значимое уменьшение краевого угла смачивания связующего. Поскольку чем лучше компоненты смачиваются связующим, тем прочнее композиционный материал, следовательно, можно предположить повышение физико-механических свойств полуфабриката филаментов, армированных непрерывным углеродным волокном, которые получены путем пропитки в ультразвуковом поле.

Основная задача при разработке ПКМ и конструировании изделий из них формулируется следующим образом: как зависят свойства армированных материалов от адгезионной прочности соединения «волокно – матрица» и какими факторами эта зависимость определяется, а также – каким образом можно управлять данной характеристикой [25, 26]. В полной мере это требование относится и к созданию полуфабрикатов композиционных филаментов для аддитивных технологий. Количественной характеристикой адгезии на границе раздела «связующее – наполнитель» является работа адгезии (Wa), под которой понимается работа, необходимая для обратимого изотермического разделения двух приведенных в контакт конденсированных фаз по площади единичного сечения. При этом количество и прочность связей в контакте определяется площадью фактического взаимодействия между адгезивом и субстратом, зависящей от энергетических характеристик поверхностей контактирующих фаз, шероховатости поверхности субстрата, условий

формирования адгезионного соединения, тепловых и механических свойств адгезива и субстрата [27]. Основную роль в том, насколько полно будет реализована площадь фактического контакта связующего и наполнителя, играют закономерности смачивания жидким связующим поверхности твердого тела (в нашем случае – углеродных волокон) и их термодинамическая совместимость.

Наиболее часто работу адгезии связующего к волокну рассчитывают по уравнению Юнга – Дюпре [27]:

$$Wa = \gamma_a(1 + \cos \theta), \quad (1)$$

где γ_a – поверхностное натяжение жидкого связующего, θ – равновесный краевой угол натекания связующего на поверхности волокна.

Путем расчета по формуле (1) работы адгезии для контрольных и опытных образцов с использованием экспериментально полученных значений угла θ установлено, что ее величина равна для контрольных и опытных образцов 44.71–48.98 мДж/м² и 64.46–66.4 мДж/м² соответственно. В расчетах использовано среднее поверхностное натяжение эпоксидной смолы ЭД-20 по [28]. С учетом средних значений $W_{аконтр} = 46.8$ мДж/м² и $W_{опыт} = 65.4$ мДж/м² увеличение адгезии в контакте «связующее – волокно» при изготовлении полуфабриката композиционных филаментов с воздействием ультразвука составило 39.7%, что позволяет ожидать значительное увеличение физико-механических характеристик объектов трехмерной печати.

Заключение

На основе анализа тенденций развития FDM-технологий трехмерной печати показана перспективность использования филаментов, армированных непрерывным углеродным волокном, для повышения прочности формируемых конструкций. Показано, что независимо от материала (терморезистивное или термопластичное связующее) важное значение для изготовления филамента с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками имеет качество пропитки первичного жгута углеродных волокон. Отмечена перспективность применения физических и, в частности, ультразвуковых методов для решения данной задачи.

Выполнены исследования процесса пропитки с воздействием ультразвука жгута углеродных волокон эпоксидной смолой с отвердителем



ПЭПА при изготовлении полуфабриката филаментов для использования в аддитивных технологиях печати композиционными материалами.

Установлено существенное улучшение смачиваемости волокон связующим, проявляющееся в уменьшении краевого угла смачивания с 70–77° до 35–40°.

С использованием уравнения Юнга – Дюпре рассчитана работа адгезии связующего к волокну и показано, что воздействие ультразвука в процессе пропитки волокон способствует повышению работы адгезии в среднем на 39.7%.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительного повышения прочности филамента за счет лучшего перераспределения внешних нагрузок между матрицей и наполнителем как в пределах монослоя, так и всего изделия за счет включения в работу максимального числа волокон. Это может значительно повысить прочность напечатанных изделий, армированных непрерывным углеродным волокном, и, соответственно, расширить сферу практического промышленного применения аддитивных технологий.

Список литературы

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М. : ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с.
2. Bikas N., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive Manufacturing methods and modeling approaches: A critical review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 83. P. 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
3. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб. : Научные основы и технологии, 2008. 660 с.
4. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
5. Балашов А. В., Маркова М. И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 66.
6. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9, № 4. С. 765–776. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776>
7. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T. K., Asahara H., Horiguchi K., Nakamura T., Todoroki A., Hirano Y. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation // Sci. Rep. 2016. Article number 23058. <https://doi.org/10.1038/srep23058>
8. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // Composites Part B-engineering. 2015. Vol. 80. P. 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
9. Invernizzi M., Natale G., Levi M., Turri S., Griffini G. UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites // Materials. 2016. Vol. 9, iss. 7. P. 583. <https://doi.org/10.3390/ma9070583>
10. Polyzos E., Katalagarianakis A., Van Hemelrijck D., Pyl L., Polyzos D. A. Multi Scale Analytical Methodology for the Prediction of Mechanical Properties of 3D-printed Materials with continuous Fibres // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. Article number 101394. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101394>
11. Wang F., Wang G., Zhang Z., Ning F. Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of continuous Carbon Fiber reinforced Poly(lactic Acid) Composites // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 37. Article number 101661. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101661>
12. Кулезнев В. С., Шеринев А. С. Химическая и физическая модификация полимеров. М. : Химия, 1990. 207 с.
13. Студенцов В. Н. Физическая модификация армированных реактопластов // Вестник СГТУ. 2011. № 4, вып. 3. С. 209–218.
14. Негров Д. А. Влияние энергии ультразвуковых колебаний на структуру и свойства полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2009. 123 с.
15. Хозин В. Г., Каримов А. А., Череватский А. М., Полянский А. А., Мурафа А. В. Модифицирование эпоксидных композиций ультразвуком // Механика композиционных материалов. 1984. № 4. С. 702–706.
16. Хмелев В. Н., Башара В. А., Никитин А. А., Цыганок С. Н., Барсуков Р. В. Создание ультразвуковой установки для пропитки изделий из композиционных полимерных материалов // Композиты – в народное хозяйство России (Композит '99) : сборник международной научно-технической конференции: тезисы докладов. Барнаул : АлГТУ, 1999. С. 42–43.
17. Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н., Сливин А. Н., Хмелев М. В. ; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова». Устройство для ультразвуковой пропитки. Патент № 2224649 РФ, МПК В29В 15/10, С08J 7/18, В05С 3/12. Заявка 2003104729/15, 17.02.2003 ; опубликовано 27.02.2004, 10 с.
18. Волков С. С., Бигус Г. А., Ремизов А. Л. Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2018. № 5-6. С. 50–55. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-5-6-50-55>
19. Хмелев В. Н., Хмелев С. С., Цыганок С. Н., Титов Г. А. Ультразвуковая пропитка полимерных композиционных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 2. С. 193–196.



20. Хмелев В. Н., Хмелев С. С., Карзакова К. А., Гольх Р. Н. Повышение эффективности ультразвукового воздействия при производстве высоконаполненных композиционных материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 2. С. 189–192.
21. Khmelev V. N., Khmelev S. S., Tsyganok S. N., Titov G. A. The Ultrasonic Impregnation of Polymer Composite Materials // International Workshop and Tutorias on Electron Devices and Materials, EDM. Proceedings. 2012. P. 170–173.
22. Lionetto F., Dell'Anna R., Montagna F., Maffezzoli A. Ultrasonic Assisted Consolidation of Commingled Thermoplastic/Glass Fiber Rovings // Front. Mater. 2015. Vol. 2. P. 32. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00032>
23. Smirnov S. V., Veretennikova I. A., Konovalov D. A., Michurov N. S., Osipova V. A., Pestov A. V. Effect of hardeners on the mechanical properties of epoxy coatings based on ED-2 resin // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2023. Iss. 1. P. 6–16. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2023.1.006-016>
24. Нуштаева А. В., Мельникова К. С., Просвирни-на К. М., Нуштаева С. А. Измерение краевого угла методом сидячей капли на вертикальной поверхности // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-13. С. 2855–2859.
25. Богданова Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов : учебное пособие. М. : МГУ им. М. В. Ломоносова. 2010. 68 с.
26. Берлин А. А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб. : Профессия, 2009. 556 с.
27. Богданова С. А., Слобожанинова М. В., Вашурин С. А., Дебердеев Р. Я., Барабанов В. П. Растекание эпоксидной смолы и полиэфира на поверхности субстратов с различной полярностью // Структура и динамика молекулярных систем. Яльчик-2002 : сборник статей. Йошкар-Ола : Изд-во МарГТУ, 2002. С. 60–63.
28. Антипов Ю. В., Круглов Е. В., Пахомов К. С., Чалых А. Е. Влияние потока плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления на адгезионные и физико-механические характеристики арамидных и углеродных волокон // Пластические массы. 2021. № 9–10. С. 8–11. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-9-10-8-11>
29. Физика и техника мощного ультразвука : в 3 кн. / АН СССР. Акустический ин-т ; под ред. [и с предисл. Л. Д. Розенберга]. М. : Наука, 1967–1970. Кн. 3 : Физические основы ультразвуковой технологии / [авт. В. Ф. Казанцев, А. М. Мицкевич, Б. А. Агранат и др.]. 1970. 689 с.
30. Розина Е. Ю. Кавитационный режим звукокапиллярного эффекта // Акустичний вісник. 2003. Т. 6, № 1. С. 48–59.
- printing, rapid prototyping and direct digital production]. Moscow, TECHNOSPHERE, 2016. 656 p. (in Russian).
2. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive Manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 83, pp. 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>
3. Mikhailin Yu. A. *Spetsial'nye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials]. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008. 660 p. (in Russian).
4. Mikhailin Yu. A. *Konstruktсионnye polimernye kompozitsionnye materialy. 2-e izd.* [Structural polymer composite materials. 2nd ed.]. St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2010. 822 p. (in Russian).
5. Balashov A. V., Markova M. I. Investigation of the structure and properties of products obtained by 3D printing. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 1 (52), pp. 66. (in Russian).
6. Petrov V. M., Bezpachuk S. N., Yakovlev S. P. On the influence of structure on the strength of plastic products obtained by 3D printing. *Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the Sea and River Fleet*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 765–776 (in Russian). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776>
7. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T. K., Asahara H., Horiguchi K., Nakamura T., Todoroki A., Hirano Y. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Sci Rep.*, 2016, article no. 23058. <https://doi.org/10.1038/srep23058>
8. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B-engineering*, 2015, vol. 80, pp. 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
9. Invernizzi M, Natale G, Levi M, Turri S, Griffini G. UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites. *Materials*, 2016, vol. 9, iss. 7, pp. 583. <https://doi.org/10.3390/ma9070583>
10. Polyzos E., Katalagarianakis A., Hemelrijck D. Van, Pyl L., Polyzos D. A. Multi Scale Analytical Methodology for the Prediction of Mechanical Properties of 3D-printed Materials with continuous Fibres. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 36, article no. 101394. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101394>
11. Wang F., Wang G., Zhang Z., Ning F. Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of continuous Carbon Fiber reinforced Polylactic Acid Composites. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, article no. 101661. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101661>
12. Kuleznev V. S., Shershnev A. S. *Khimicheskaja i fizicheskaja modifikatsiia polimerov* [Chemical and physical modification of polymers]. Moscow, Khimiya, 1990. 207 p. (in Russian).
13. Studentsov V. N. Physical modification of reinforced reactoplasts. *Vestnik Saratov State Technical University*, 2011, no. 4, iss. 3, pp. 209–218 (in Russian).
14. Negrov D. A. *The influence of the energy of ultrasonic vibrations on the structure and properties of a poly-*

References

1. Gibson Ya., Rosen D., Stocker B. *Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaia pechat', bystroe prototipirovanie i pryamoje tsifrovoe proizvodstvo* [Additive manufacturing technologies. Three-dimensional



- mer composite material based on polytetrafluoroethylene. Thesis Diss. Cand. Sci. (Tech.). Omsk, 2009. 123 p. (in Russian).
15. Khozin V. G., Karimov A. A., Cherevatsky A. M., Polyansky A. A., Murafa A. V. Modification of epoxy compositions by ultrasound. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov*, 1984, no. 4, pp. 702–706 (in Russian).
 16. Khmelev V. N., Bashara V. A., Nikitin A. A., Tsyganok S. N., Barsukov R. V. Creation of an ultrasonic device for impregnating products from composite polymer materials. *Kompozity – v narodnoe khozyaistvo Rossii» (Kompozit '99): sbornik mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii: tezisy dokladov* [Composites – in the national economy of Russia (Composite '99): Collection of abstracts of the international scientific and practical conference]. Barnaul, Polzunov Altai State Technical University Publ., 1999, pp. 42–43 (in Russian).
 17. Khmelev V. N., Barsukov R. V., Tsyganok S. N., Slivin A. N., Khmelev M. V. Polzunov Altai State Technical University. *Device for ultrasonic impregnation*, RU No. 2224649, MPK V29V 15/10, 2004 (in Russian).
 18. Volkov S. S., Bigus G. A., Remizov A. L. Technology and equipment for ultrasonic welding of polymer composite materials. *Plasticheskie massy* [Plastic Masses], 2018, no. 5-6, pp. 50–55 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-5-6-50-55>
 19. Khmelev V. N., Khmelev S. S., Tsyganok S. N., Titov G. A. Ul'trazvukovaia propitka polimernykh kompozitsionnykh materialov [Ultrasonic impregnation of polymer composite materials]. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 193–196. (in Russian).
 20. Khmelev V. N., Khmelev S. S., Kazakova K. A., Golykh R. N. Improving the efficiency of ultrasonic exposure in the production of highly filled composite materials. *South-Siberian Scientific Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 189–192 (in Russian).
 21. Khmelev V. N., Khmelev S. S., Tsyganok S. N., Titov G. A. The Ultrasonic Impregnation of Polymer Composite Materials. *International Workshop and Tutorias on Electron Devices and Materials, EDM. Proceedings*, 2012, pp. 170–173.
 22. Lionetto F., Dell'Anna R., Montagna F., Maffezzoli A. Ultrasonic Assisted Consolidation of Commingled Thermoplastic/Glass Fiber Rovings. *Front. Mater.*, 2015, vol. 2, pp. 32. <https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00032>
 23. Smirnov S. V., Veretennikova I. A., Konovalov D. A., Michurov N. S., Osipova V. A., Pestov A. V. Effect of hardeners on the mechanical properties of epoxy coatings based on ED-2 resin. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2023, iss. 1, pp. 6–16. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2023.1.006-016>
 24. Nushtaeva A. V., Melnikova K. S., Prosvirina K. M., Nushtaeva S. A. Contact angle measurements by sessile-drop technique on a vertical surface. *Fundamental Research*, 2015, no. 2-13, pp. 2855–2859 (in Russian).
 25. Bogdanova Yu. G. *Adgeziia i ee rol' v obespechenii prochnosti polimernykh kompozitov: uchebnoe posobie* [Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites. Textbook]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2010. 68 p. (in Russian).
 26. Berlin A. A. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: Structure, properties, technology]. St. Petersburg, Professiya, 2009. 556 p. (in Russian).
 27. Bogdanova S. A., Slobozhaninova M. V., Vashurin S. A., Deberdeev R. Ya., Barabanov V. P. Spreading of epoxy resin and polyester on the surface of substrates with different polarity. *Struktura i dinamika molekuliarnykh sistem. Ial'chik-2002: sbornik statei* [Structure and Dynamics of Molecular Systems. Yalchik-2002: Coll. of arts.]. Yoshkar-Ola, MarGTU Publ., 2002, pp. 60–63 (in Russian).
 28. Antipov Yu. V., Kruglov E. V., Pakhomov K. S., Chalykh A. E. Influence of plasma flow of high-frequency capacitive discharge of reduced pressure on adhesive and physico-mechanical characteristics of aramid and carbon fibers. *Plasticheskie massy* [Plastic Masses], 2021, no. 9–10, pp. 8–11 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-9-10-8-11>
 29. *Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka: v 3 kn. AN SSSR. Akusticheskii institut; pod red. L. D. Rozenberga. Kn. 3: Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* [Rosenberg L. D., ed. Physics and technology of powerful ultrasound: in 3 books. Book 3: Physical foundations of ultrasonic technology]. Moscow, Nauka, 1970. 689 p. (in Russian).
 30. Rozina E. Yu. Cavitation mode of the sound capillary effect. *Akustichnyi visnyk*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 48–59 (in Russian).

Поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 25.08.2023
The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accepted for publication 25.08.2023



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 62–75
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 62–75
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІЖКУ

Научная статья
УДК 621.37

Приборы на ПАВ на частотных гармониках. Особенности расчета параметров ПАВ методом конечных элементов

А. С. Койгеров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5

Койгеров Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, a.koigerov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>, AuthorID: 570937

Аннотация. Работа посвящена вопросам расчета параметров поверхностных акустических волн (ПАВ) основной и кратных частотных гармоник с помощью метода конечных элементов. Рассмотрена методика и основные особенности анализа ПАВ численным методом. В качестве основной модели исследования выбраны простые тестовые ячейки в одну длину волны. Показано, что, используя данные параметры ПАВ в аналитической модифицированной модели связанных мод, можно предварительно рассчитывать амплитудно-частотные характеристики приборов на ПАВ с применением частотных гармоник высших порядков. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными измерениями коэффициента передачи фильтра и линии задержки на ПАВ.

Ключевые слова: устройства на ПАВ, линия задержки, акустоэлектронные устройства, гармоники ПАВ, модель связанных мод, МКЭ, COMSOL, фильтры на ПАВ

Благодарности: Автор выражает благодарность генеральному директору – генеральному конструктору ООО «АЭК Дизайн» В. Р. Реуту за предоставленные экспериментальные данные.

Для цитирования: Койгеров А. С. Приборы на ПАВ на частотных гармониках. Особенности расчета параметров ПАВ методом конечных элементов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 62–75. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІЖКУ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

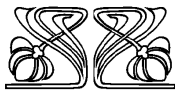
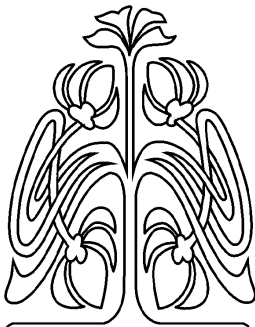
SAW devices on frequency harmonics. Features of calculation of SAW parameters by the finite element method

A. S. Koigerov

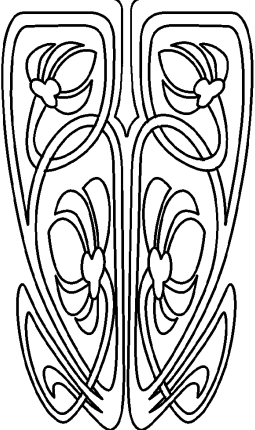
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova St., St. Petersburg 197376, Russia

Aleksey S. Koigerov, a.koigerov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>, AuthorID: 570937

Abstract. Background and Objectives: Acoustoelectronic devices (filters, delay lines, resonators, etc.) are used in a wide range of applications in various industries. Surface acoustic waves (SAW) filters are key elements of wireless communication systems, such as base stations, satellite communication and mobile systems. The aim of this work was to investigate the issue of designing SAW devices on frequency harmonics, which potentially allows you to work at higher frequencies.



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





To design devices using a model of coupling of modes (COM), a set of SAW parameters is required. **Materials and Methods:** A technique for extracting SAW parameters of the main and multiple frequency harmonics under the electrodes using the finite element method in COMSOL are presented. The methodology and the main features of the analysis of SAW by the numerical method are considered. Then, based on the extracted parameters, a quartz SAW filter and a lithium niobate SAW delay line were calculated using transducers operating at the 3rd harmonic. The results of calculating the frequency response were compared with the results of the experiment. **Results and Conclusions:** The proposed algorithm allows to extract the SAW parameters of each of the harmonics and take them into account in quick calculations on base COM. The results of numerical analysis of the SAW parameters, a COM model and a matrix approach to formalizing calculations provide the developer with an effective and easily adaptable tool for calculating the frequency responses of SAW devices.

Keywords: surface acoustic waves devices, delay line, acoustoelectronic devices, SAW harmonics, coupling of modes, FEM, COMSOL, SAW filter

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to the general director and the general designer "AEC Design" Vladimir R. Reut for the experimental data provided.

For citation: Koigerov A. S. SAW devices on frequency harmonics. Features of calculation of SAW parameters by the finite element method. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 62–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІJKU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Акустоэлектронные приборы (фильтры, линии задержки (ЛЗ), резонаторы и др.) используются в широком спектре приложений в различных отраслях промышленности. Так, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [1] и объемных акустических волнах (ОАВ) [2] являются ключевыми элементами систем беспроводной связи, таких как базовые станции, системы спутниковой и мобильной связи. ПАВ-радиометки и ПАВ-датчики [3–5] используются в системах промышленной автоматизации для таких задач, как мониторинг, управление и измерение технологических процессов. Кроме того, датчики на ПАВ используются в автомобильной электронике для таких приложений, как системы контроля давления в шинах, системы управления двигателем и системы обнаружения столкновений [6]. Резонаторы на ПАВ используются в качестве частотоопределяющих элементов в генераторах [7].

Область приборов на ПАВ продолжает развиваться благодаря постоянным исследованиям и разработкам. Некоторые из ключевых направлений развития устройств на ПАВ включают:

- миниатюризацию и интеграцию с другими технологиями,
- работу на более высоких частотах,
- исследование новых материалов и конструкций устройств.

Приборы, использующие ПАВ, традиционно применяются в частотном диапазоне от десятков мегагерц до 2.5–3 ГГц. Однако возрастает интерес к разработке приборов на ПАВ для работы на еще более высоких частотах, что подталкивает к изучению последних достижений в области материалов, технологий изготовления и конструкций таких устройств.

Известно, что встречно-штыревой преобразователь (ВШП) может генерировать гармонические частоты, кратные основной частоте устройства на ПАВ.

Проектирование устройств на ПАВ представляет собой сложную техническую задачу, поскольку существуют сложные акустические взаимосвязи между топологическими элементами (ВШП и отражательными структурами), резонансные особенности акустических процессов, чувствительность электрических характеристик от геометрии топологических элементов. Все эти аспекты также зависят от параметров акустических волн и свойств пьезоэлектрического материала. Единых подходов и программ для расчета приборов на ПАВ не существует; каждый разработчик использует разные подходы к моделированию и использует собственное программное обеспечение.

Наиболее часто встречаются два подхода:

- на основе быстрых аналитических моделей, например метод эквивалентных схем [8], и модель связанных мод (МСМ, англ. coupling-of-modes (COM)) [9, 10],
- на основе численных расчетов [11–13].

Единственным более-менее унифицированным подходом можно назвать численный подход, основанный на методе конечных элементов (МКЭ).

Цель работы – показать возможность проектирования приборов на ПАВ, работающих с использованием высших частотных гармоник, и особенности анализа гармоник ПАВ на основе МКЭ в среде COMSOL Multiphysics (далее COMSOL).

1. Частотные гармоника ПАВ

На генерацию гармоник в устройствах на ПАВ могут влиять различные факторы, такие как топологические особенности конструкции.



Эти особенности включают в себя коэффициент металлизации (отношение ширины электрода a к шагу электродов ВШП p , обозначаемое как $C_m = a/p$), толщину металлизации (h), форму электрода и тип преобразователя. Исследование методов оптимизации генерации гармоник в устройствах на ПАВ, включая проектирование конкретных структур преобразователя, выбор материалов и методов контроля параметров гармоник является довольно сложной, но актуальной на сегодняшний день задачей. Некоторые исследования по данной теме представлены в работах [14–20]. Гармоники волны Рэлея рассматриваются в работе [14], гармоники вытекающих ПАВ представлены в [15]. Экспериментальные и теоретические исследования гармонического режима для различных классов устройств на ПАВ представлены в [16–20], например двухпортовые резонаторы [16], фильтры [17], метки [18], датчики [19], устройства с температурной компенсацией ПАВ [20].

Подход проектирования устройств с использованием высших гармоник позволяет изготавливать устройства на ПАВ, работающие на частотах выше 2.5 ГГц, без применения методов субмикронной литографии. На рис. 1 представлен пример расчета проводимости ВШП в COMSOL с помощью решателя (Study – Frequency Domain). Преобразователь состоит из $N = 6$ (пар расщепленных электродов). Как видно, помимо отклика на основной частоте в окрестности 1.5 ГГц, присутствует отклик в районе частоты 4.5 ГГц (работа на 3-й гармонике).

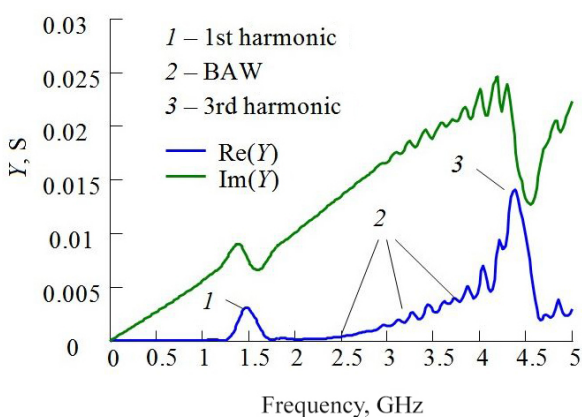


Рис. 1. Проводимость ВШП с расщепленными электродами (число пар $N = 6$, электродов – 24) на материале $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (цвет онлайн)

Fig. 1. IDT admittance with split electrodes (number of periods $N = 6$, electrodes – 24) on material $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (color online)

Стоит отметить ряд недостатков, присущих гармоникам:

- 1) высокие вносимые потери с увеличением частоты,
- 2) наличие спектра объемных акустических волн, возбуждаемых в том же диапазоне частот,
- 3) наличие нежелательных гармоник, которые могут возбуждаться одновременно.

Как правило, разработчики и пользователи хотели бы, чтобы устройства на ПАВ работали на одной выбранной гармонике, подавляя нежелательные другие гармоники.

На сегодняшний день наиболее популярными программами для численного моделирования акустоэлектронных устройств на ПАВ и ОАВ являются COMSOL и ANSYS [21, 22].

2. Модель ячейки в COMSOL

Метод конечных элементов – хороший инструмент для анализа свойств и расчета характеристик различных устройств и материалов. Применение МКЭ позволяет получать сведения о физических процессах в твердых телах, минуя необходимость изготовления физического прототипа. Для формирования модели возможно использование различных пакетов мультифизического моделирования, таких как, например, COMSOL.

COMSOL позволяет моделировать как конечные структуры, в виде отдельных ВШП, так и устройства в целом (например, в составе двух, трех преобразователей и групп отражательных решеток). При проведении моделирования возможно непосредственное определение частотных зависимостей проводимостей (Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22}), на основе которых можно вычислить S -параметры. Тем не менее, учет большого числа параметров при трехмерном моделировании реальных полноапертурных устройств сопровождается значительным увеличением требований к вычислительным ресурсам и продолжительности времени анализа. Расчет устройств таким способом на основе численного анализа может занимать до 10–20 часов на одну итерацию. Одним из самых быстрых и эффективных методов расчета устройств на ПАВ является МСМ. Наиболее быстро и эффективно можно считать устройства на ПАВ с помощью МСМ. Расчет одной итерации занимает секунды, поскольку основан на матричных вычислениях. Особенностью данного подхода на основе МСМ является необходимость предварительного анализа параметров.



Эти параметры можно получить, например, с использованием численных методов, при анализе простых ячеек и конструкций, что не требует значительных временных и ресурсных затрат. Важно отметить, что точность расчетов при использовании МКЭ и МСМ будет сопоставима при применении адекватных параметров, которые точно описывают волновые процессы и соответствуют физико-математической модели. Однократный расчет параметров ПАВ на базе простых ячеек позволяет сформировать «библиотеку» материалов, к которой можно в будущем обращаться при моделировании широкого круга устройств (резонаторы, ЛЗ, фильтры).

Для разработки приборов на ПАВ требуется учесть следующие основные параметры [21]:

- скорость распространения волны на свободной поверхности;
- скорость распространения волны под металлизированной поверхностью;
- скорость волны под элементами преобразователя и отражательных решеток;
- коэффициент отражения волны от одиночного электрода;
- коэффициент прохождения волны через одиночный электрод;
- коэффициент, определяющий эффективность акустоэлектронного преобразования или коэффициент электромеханической связи (КЭМС);
- добротность ячейки, характеризующая потери за счет утечки волны в объем подложки;
- затухание ПАВ в подложке (потери на распространение, резистивные потери);
- статическая емкость электрода.

Отметим, что при определении указанных параметров необходимо учитывать значительное количество степеней свободы, связанных с топологическими, конструктивными и технологическими особенностями устройств. Среди таких факторов следует выделить [21]:

- геометрию элементарной ячейки преобразователя;
- профиль металлического электрода;
- вид металлической электродной ОС (закороченная или электрически разомкнутая);
- коэффициент металлизации электрода;
- толщину металлизации электрода [21].

В настоящей работе представлен анализ периодических электродных структур на пьезоэлектрических подложках, основным типом волны в которых является волна Рэлея на основной и 3-й гармониках. В качестве ВШП рассматривается преобразователь с расщепленными электродами. Численные расчеты можно проводить в различных областях, подключая решатели: область собственных частот, частотную область и стационарный режим. В результате численного расчета, например, в области собственных частот, будет получен набор акустических мод или собственных частот, по которым можно перейти к ряду необходимых параметров ПАВ по известной методике [21].

Одной из основных особенностей и проблем, связанных с использованием МКЭ, является значительное потребление ресурсов компьютера и времени, что представляет вызов для разработчика. На рис. 2 представлен подход, направленный на уменьшение и упрощение рассматриваемой задачи.

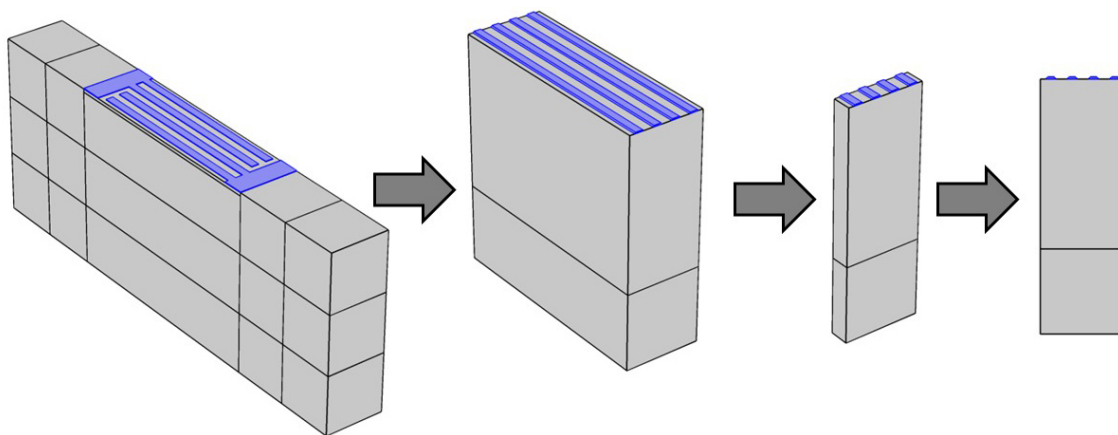


Рис. 2. Принцип перехода от 3D к 2D геометрии при анализе преобразователя с расщепленными электродами
 Fig. 2. Principle of transition from 3D to 2D geometry for analyzing a transducer with split electrodes



На рис. 3 представлен пример анализируемых тестовых структур, осуществленный при помощи программного пакета COMSOL. Речь идет о периодических электродных структурах с заданными параметрами: периодом $p = \lambda/4$ и шириной электродов $a = \lambda/8$. Размер ячейки установлен в пределах одной длины волны ($\lambda = 2$ мкм). Глубина анализируемой поверхности равна 4 длинам волн. Граничные условия сконфигурированы таким образом, что данная структура рассматривается как бесконечная периодическая решетка металлических электродов. В нижней части подложки размещен идеально согласованный слой, который поглощает исходящие волны с целью ограничения области численного моделирования. Материал электродов – алюминий. Учитывая, что поверхностная волна распространяется на глубину, приблизительно равную одной длине волны, при построении сетки область у поверхности должна содержать более плотную сетку, например 20 элементов на длину волны. Для остальной части структуры рекомендуется

использовать менее плотную сетку – 10 элементов на длину волны (см. рис. 3).

3. Анализ параметров ПАВ

Принцип анализа параметров ПАВ под системой электродов с использованием МКЭ может быть проиллюстрирован с помощью блок-схемы, изображенной на рис. 4. Этот подход включает в себя использование трех решателей в программном пакете COMSOL:

- расчет в области собственных частот (Study – Eigenfrequency),
- расчет в частотной области (Study – Frequency Domain),
- статический анализ (Study – Stationary).

Отдельно поясним смысл собственных мод ПАВ [21]. Расчет собственных частот представляет собой один из подходов по анализу различных акустических мод, которые могут возбуждаться в изучаемой тестовой ячейке. Понятие «собственные частоты» может быть пояснен через аналогию с колебательной системой. Если создать условия, при которых ячейка получит энергию

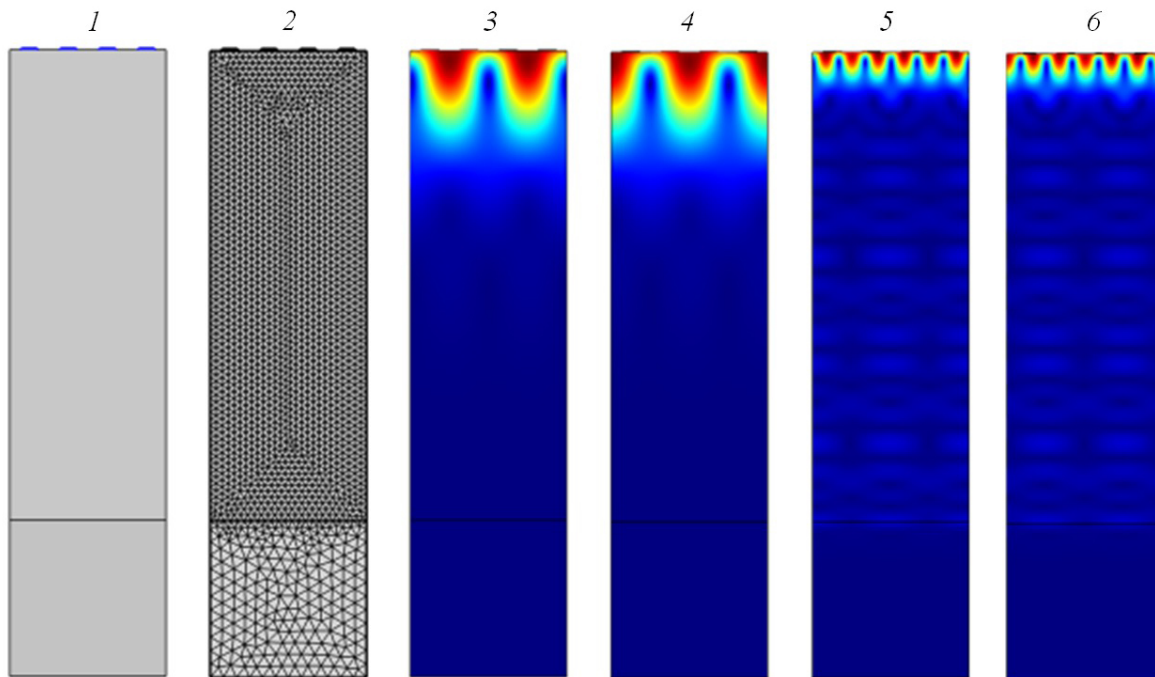


Рис. 3. Иллюстрация тестовой ячейки для проведения анализа параметров акустических волн под металлическими электродами в кристалле 128°Y-X LiNbO₃: 1 – геометрия, 2 – сетка, 3, 4 – результаты численного анализа основной гармоники первой собственной частоты (3) и второй собственной частоты (4) соответственно; 5, 6 – результаты численного анализа 3-й гармоники первой собственной частоты (5) и второй собственной частоты (6) соответственно (цвет онлайн)

Fig. 3. Illustration of a test cell for analyzing the parameters of acoustic waves under metal electrodes in a 128°Y-X LiNbO₃ crystal: 1 – geometry, 2 – mesh, 3, 4 – results of numerical analysis of the main harmonic of the first eigenfrequency (3) and the second eigenfrequency (4), 5, 6 – results of numerical analysis of the 3rd harmonic of the first eigenfrequency (5) and the second eigenfrequency (6) (color inline)

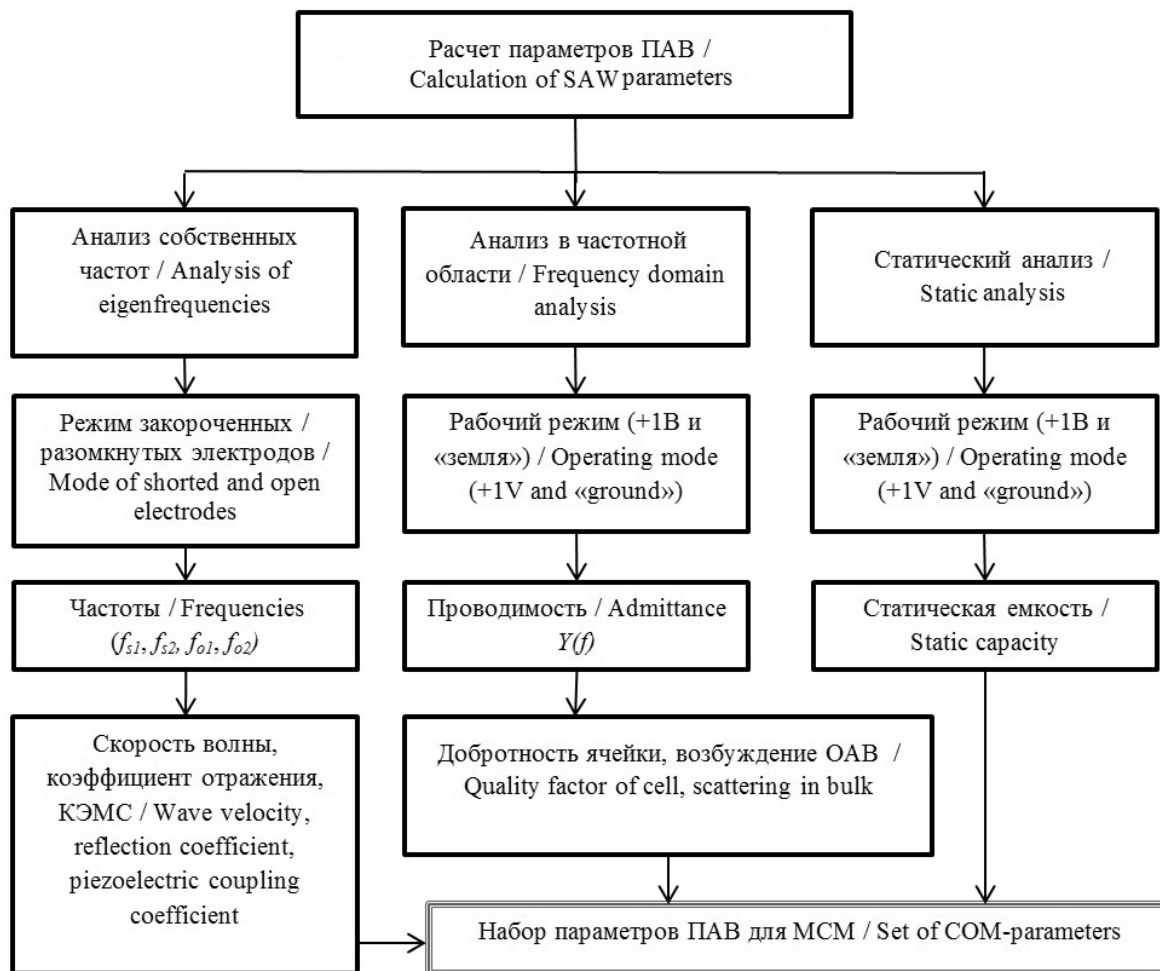


Рис. 4. Методика расчета и анализа параметров ПАВ основной и кратных частотных гармоник под системой электродов с помощью COMSOL

Fig. 4. A technique for extracting and analyzing the SAW parameters of the main and multiple frequency harmonics under the electrodes using COMSOL

благодаря пьезоэлектрическому эффекту, с последующим отсутствием внешних воздействий на колебательную систему, то в отсутствие потерь в ней возникнут незатухающие собственные (или свободные) колебания на частотах, называемых собственными. Каждая возбуждаемая акустическая мода (поверхностные акустические волны, псевдоповерхностные акустические волны, объемные акустические волны и их гармоники) на собственных частотах характеризуется собственными формами колебания [21].

При анализе ячейки бесконечной периодической системы неоднородностей (металлических электродов) можно выделить пару собственных частот для рассматриваемой акустической моды. В данном случае полоса брэгговского отражения волн размещается именно между этими частотами. Если рассматривать однородную ячейку

без условий для отражения (с полностью свободной или металлизированной поверхностью), то собственная частота для рассматриваемой акустической моды будет единственной, так как отсутствует условие Брэгга, т. е. условие синхронного отражения волны от системы периодических неоднородностей [21].

Поэтому для расчета полного набора МСМ-параметров необходимо проанализировать как минимум три тестовых ячейки: свободная поверхность, полностью металлизированная поверхность и поверхность с электродами.

Пример отображения пары собственных частот для основной и 3-й гармоники представлен на рис. 3. Подробно методика расчета на примере основной гармоники рассмотрена в статье [21], существенным дополнением, представленным в данной работе, является анализ про-



димости в заданном частотном диапазоне, что позволяет оценить рассеяние волны в объем подложки.

Для поверхности без системы электродов, будь то свободная или металлизированная, имеется единственная собственная частота, которая позволяет вычислить фазовую скорость ПАВ. Скорость ПАВ на свободной поверхности (V) и на металлизированной поверхности (V_m) определяется следующими формулами [21]:

$$V_0 = f_0 \cdot \lambda, \quad (1)$$

$$V_m = f_m \cdot \lambda, \quad (2)$$

где f_0, f_m представляют собой собственные частоты для свободной и металлизированной поверхности соответственно.

Исходя из известных скоростей для свободной (V) и металлизированной (V_m) поверхности (при $h/\lambda \rightarrow 0$), можно определить КЭМС следующим образом [21]:

$$K^2 = 2 \frac{V_0 - V_m}{V_0}. \quad (3)$$

Определив набор собственных частот (f_1 и f_2) для электродных структур можно произвести расчет таких параметров ПАВ, как скорость

распространения и коэффициент отражения [21]:

$$V = \frac{f_1 + f_2}{2} \cdot \lambda, \quad (4)$$

$$r = \pi \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}. \quad (5)$$

Рассеяние волны или утечку волны в объем можно выразить через добротность ячейки. Один из методов анализа утечки волны заключается в исследовании резонансного пика характеристики проводимости (расчет в разделе Study – Frequency Domain). Добротность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f_{-3dB}}, \quad (6)$$

где f_r – частота резонанса, Δf_{-3dB} – ширина полосы характеристики проводимости на уровне –3 дБ.

Некоторые результаты анализа параметров ПАВ представлены на рис. 5 и рис. 6. Так, на рис. 5, а представлены зависимости скоростей волны Рэлея под электродами для подложки $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ для ВШП с расщепленными электродами. Скорость основной гармоники (для ВШП с электродами $\lambda/8$) имеет практически линейную зависимость как от коэффициента металлизации (C_m), так и толщины электрода (h).

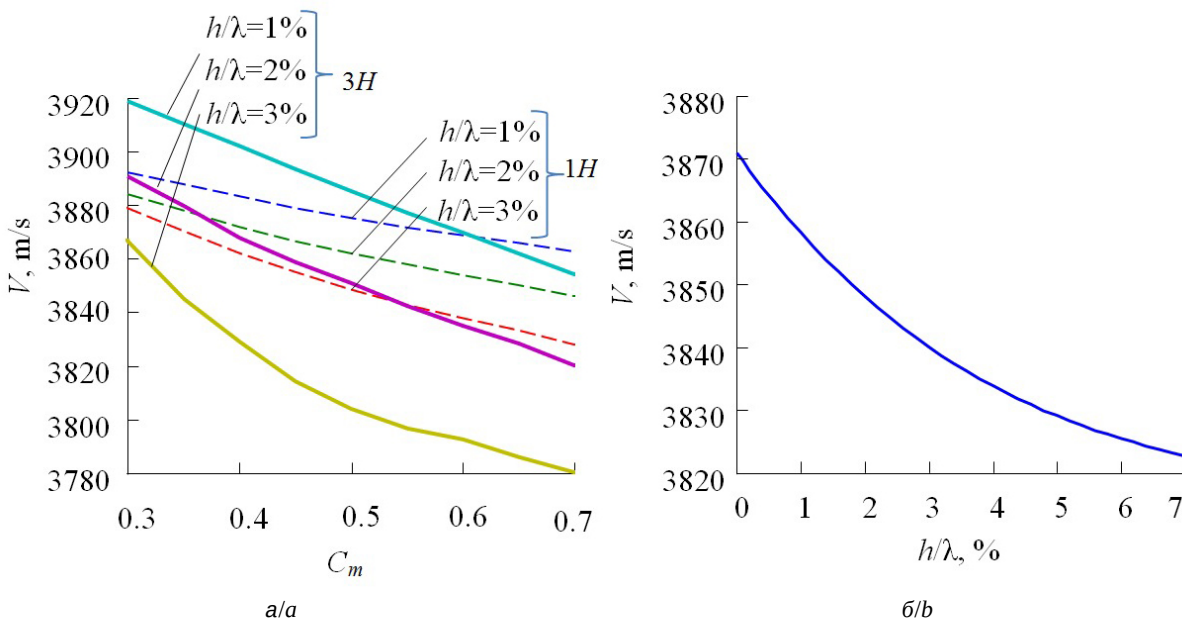


Рис. 5. Результаты расчета скоростей ПАВ через собственные частоты: а – зависимость скорости волны под электродами преобразователя с расщепленными электродами от относительной толщины металлизации и коэффициента металлизации для 1-й гармоники (1H) и 3-й гармоники (3H), б – зависимость скорости ПАВ под полностью металлизированной поверхностью (цвет онлайн)

Fig. 5. Result of calculation of SAW velocities via eigenfrequencies: а – dependence of SAW velocity under the IDT with split electrodes on the relative thickness metallization and the metallization coefficient for the 1st harmonic (1H) and the 3rd harmonic (3H), б – dependence of SAW velocity under metallization surface (color online)

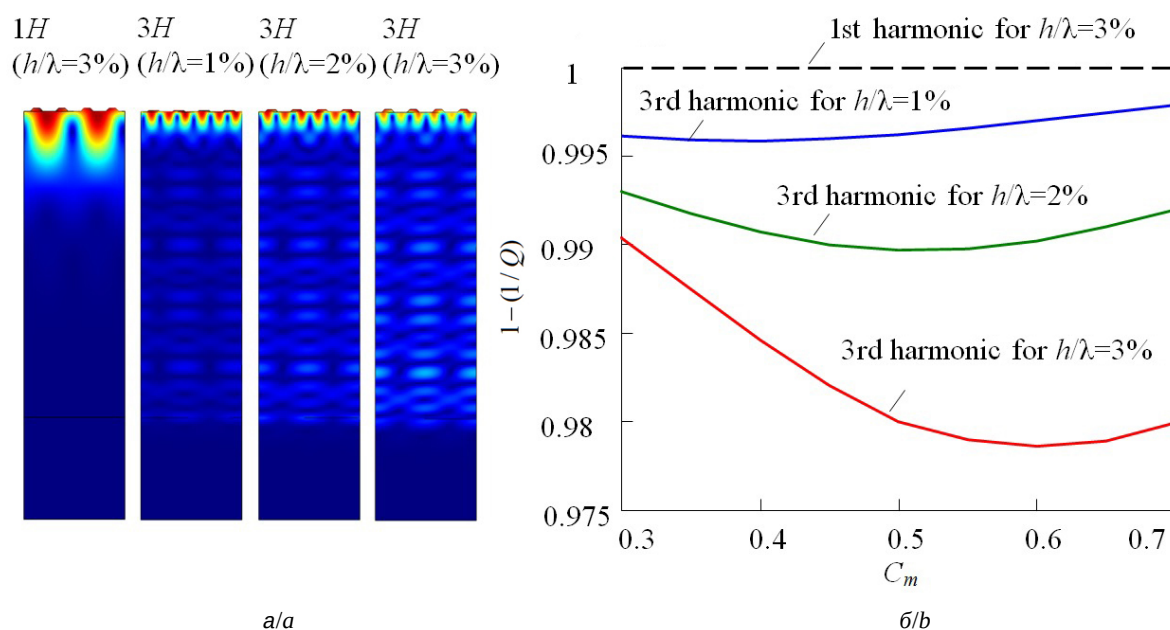


Рис. 6. Результаты анализа рассеяния волны основной (1H) и 3-й (3H) гармоник в объем подложки: а – формы механического смещения для различных относительных толщин металлизации ВШП для одной из собственных частот, б – коэффициент потерь, выраженный через добротность ячейки (цвет онлайн)

Fig. 6. Results of the analysis of wave scattering of the main (1H) and 3rd (3H) harmonics into the volume of the substrate: а – forms of mechanical displacement for various relative thickness metallization of IDT for one of the eigenfrequencies, б – loss factor expressed in terms of the quality factor of a cell (color inline)

В то время как для волны на 3-й гармонике (ВШП с электродами $3\lambda/8$) с ростом h/λ проявляется небольшая нелинейность. С ростом «массовой нагрузки» от металла волна замедляется, и наблюдаем уменьшение скорости ПАВ. На рис. 5, б представлена зависимость скорости ПАВ под полностью металлизированной поверхностью от толщины металлизации. Расчетная скорость на свободной поверхности составила 3981 м/с, в то время как в [23] – 3979 м/с. Расчетная скорость под металлом (при $h/\lambda \rightarrow 0$) составляет 3871 м/с, в [23] – 3871.6 м/с. Как видно, различие в определении скорости при условии свободной поверхности и металлизированной поверхности не превышает 0.05%. Соответственно расчетный КЭМС составляет 5.54%, а из [23] – 5.4%.

Рассеяние или утечку волны в объем можно выразить через добротность ячейки. На рис. 6, а представлены формы колебаний основной и 3-й гармоник для $C_m = 0.5$ соответствующих толщин металлизации на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$. Четко видно, что для волны Рэлея и её основной гармоники отсутствует какая-либо дополнительная утечка в подложку, в то время как для волны на 3-й гармонике можно наблюдать

паразитное рассеивание в объем подложки с ростом толщины металлизации. Расчет в COMSOL в частотной области и пересчет добротности ячейки по формуле (6) подтвердил это. Результаты расчета зависимости величины рассеивания от толщины металлизации и коэффициента металлизации можно наблюдать на рис. 6, б.

Результаты статического анализа показывают, что для ВШП с расщепленными электродами (ширина электрода – $\lambda/8$) статическая емкость на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ составляет $C_1 = 696.1$ пФ/м, в то время как для преобразователя с электродами $\lambda/4$ емкость пары $C_0 = 492.2$ пФ/м. Отношение $C_1/C_0 = 1.41$ [21], что полностью соответствует известным теоретическим и экспериментальным данным [23]. Сопоставление с литературными источниками позволяет заключить о эффективности данного метода анализа.

Численный расчет позволяет оценить параметры ПАВ в довольно широком диапазоне относительных значений толщин металлизации (например, $h/\lambda = 0.1\%–7\%$) и коэффициентов металлизации (например, $C_m = 0.3–0.7$) без существенных временных затрат, поскольку расчет пары собственных частот занимает секунды.



4. Результаты эксперимента

На основе вычисленных параметров ПАВ были созданы модели трансверсальных устройств на ПАВ с использованием подложек $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ и 36°Y-X SiO_2 . Каждое из устройств включало в себя входной и выходной ВШП. Входной преобразователь в приборе на кварцевой подложке использует метод взвешивания путем удаления электродов, электроды – расщепленные (работа на 3-й гармонике). Выходной ВШП имеет амплитудную аподизацию (работа на 1-й гармонике). Входной и выходной ВШП в ЛЗ на ниобате лития – неаподизованные. Приборы изготавлива-

лись при относительных толщинах металлизации $h/\lambda = 1\%$.

На рис. 7 представлены результаты расчета и измерений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), демонстрирующие отличное соответствие между расчетом и экспериментом. Для кварцевого фильтра (рис. 7, а) зарегистрированы потери в размере 25.3 дБ, относительная полоса пропускания на уровне -3 дБ составила 0.3%, неравномерность в полосе пропускания составила 0.1 дБ, а подавление в полосе заграждения достигло -60 дБ. ЛЗ включала в себя два преобразователя: входной двунаправленный с шестью парами электродов шириной $\lambda/4$, ра-

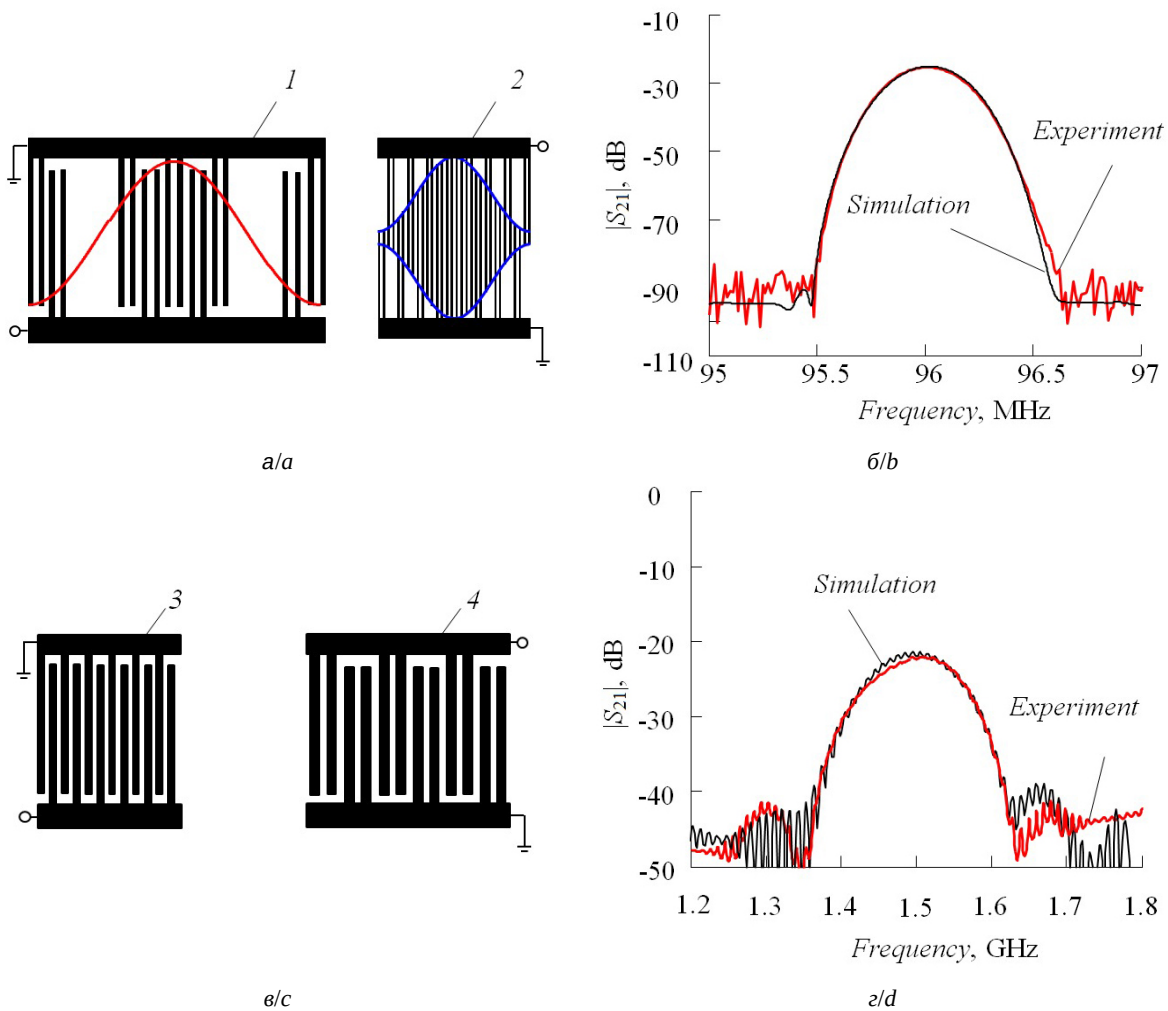


Рис. 7. Результаты расчета и эксперимента: а – топология трансверсального фильтра на ПАВ на подложке 36°Y-X SiO_2 : 1 – входной ВШП со взвешиванием с селективным удалением электродов, 2 – выходной ВШП – аподизованный (взвешивание изменением перекрытия соседних электродов); б – АЧХ трансверсального фильтра; в – топология ЛЗ на ПАВ на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$: 3 – входной ВШП с электродами $\lambda/4$, 4 – выходной ВШП с электродами $3\lambda/8$, г – АЧХ ЛЗ
Fig. 7. Results of simulation and experiment: а – transversal SAW filter topology on substrate 36°Y-X SiO_2 : 1 – input IDT using withdrawal weighting, 2 – output IDT using Overlap Weighting; б – frequency response of a transversal filter; в – SAW delay line topology on substrate $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$: 3 – IDT with $\lambda/4$ electrodes, 4 – IDT with split electrodes (electrode width $3\lambda/8$), д – frequency response of SAW delay line



ботающий на основной гармонике, и выходной с четырьмя парами расщепленных электродов шириной $3\lambda/8$, работающий на 3-й гармонике. Вносимое затухание ЛЗ на ниобате лития (рис. 7, б) составило 19.3 дБ, относительная ширина полосы пропускания на уровне -3 дБ – 14.6%, неравномерность АЧХ составила 0.4 дБ, а подавление в полосе заграждения составило 40 дБ.

Незначительные отклонения между расчетом и экспериментом в области полосы заграждения могут быть ассоциированы с присутствием паразитных индуктивностей и емкостей соединительных проводников, контактных площадок и влиянием корпуса. Определенное влияние оказывает такой «вторичный» эффект, как дифракция.

5. Обсуждение результатов

Одним из широко признанных методов теоретического моделирования устройств, использующих ПАВ, является применение МСМ. Для эффективного применения этого метода требуется набор параметров акустических волн, зависящих от геометрии элементов топологии, материалов подложек и технологических особенностей. Если обратиться к работам В. Ф. Дмитриева и Т. В. Сеницыной (ведущих в России специалистов по МСМ), то в работах [24, 25] либо просто упоминается необходимость данных параметров для МСМ, либо рассмотрен вариант расчета данных параметров через большой объем экспериментальных исследований.

В данной публикации представлена и протестирована уникальная методика оценки фундаментальных параметров высших гармоник ПАВ с использованием анализа собственных частот, анализа в частотной области и статического анализа в среде COMSOL численным способом. Использование такого комплексного подхода позволяет избежать необходимости проведения множества экспериментальных исследований для получения требуемых параметров. Физико-математическое моделирование заменяет экспериментальные исследования, что способствует более эффективному анализу. Серьезным достоинством предложенного подхода является то, что рассматриваемые простые тестовые ячейки не требуют большого вычислительного времени и ресурсов.

Обозначим несколько вопросов, которые могут возникнуть при изучении статьи:

- 1) практическая значимость,
- 2) научная новизна,

- 3) возможность проектирования устройств на гармониках для диапазона частот 5-6 ГГц (новый диапазон мобильной связи),
- 4) ограничения применения методики.

Практическая значимость данного исследования заключается в том, что предложенная методика позволяет:

- получить необходимые параметры акустических волн для последующего моделирования и предварительного расчета характеристик приборов с использованием МСМ, которая широко применяется в разработках;
- анализировать различные материалы и типы волн: волны Рэлея, вытекающие ПАВ, волны с горизонтальной поляризацией (например, STW – surface transverse waves);
- проводить анализ не только эквидистантных преобразователей с шириной электрода $\lambda/8$, $\lambda/6$ и $\lambda/4$, но и однонаправленных преобразователей вида FEUDT (floating electrode unidirectional transducer), и других, если для таких преобразователей возможно выделить регулярную геометрию, которую можно адаптировать для создания тестовой ячейки с длиной, соответствующей одной длине волны;
- проводить анализ новых материалов и срезов, имеющих известный набор физических констант и углов Эйлера;
- анализировать не только пьезоэлектрические монокристаллические подложки, но и слоистые структуры на основе пьезоэлектрической пленки / монокристалл (не пьезоэлектрический).

В качестве научной новизны можно выделить следующее: на основании большого объема численных исследований формируется «библиотека», которая устанавливает связь основных параметров поверхностных волн для МСМ в зависимости от характеристик и формы электродной структуры, а также вида применяемого пьезоэлектрического материала. Эти параметры обеспечивают согласование теоретических и экспериментальных данных в рамках одной итерации, вместо обычных 2-3. Используя данную «библиотеку», можно рассчитывать различные классы приборов на ПАВ: фильтры, резонаторы, линии задержки.

Для оценки частотного диапазона работы приборов на ПАВ в современных реалиях рассмотрим ниобат лития $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (волна Рэлея, $V_0 = 3981$ м/с) и кварц $36^\circ\text{Y-X}+90^\circ$ (волна STW, $V_0 = 5000$ м/с). Это подложки на традиционных монокристаллических материалах. Слоистые



структуры типа алмаза и сапфира с пьезоэлектрическими пленками в данной работе не рассматриваются. Возьмем ширину электрода, равную $0.35 \mu\text{м}$, и рассмотрим два типа ВШП – эквидистантный (с шириной электрода $\lambda/4$) и с расщепленными электродами (с шириной электрода $\lambda/8$). Частоту основной гармоники можно оценить как $f = V/\lambda$. Сведем результаты в таблицу.

Из таблицы видно, что потенциально на 3-й гармонике можно при той же разрешающей способности оборудования и том же технологическом процессе сделать более высокочастотное устройство.

Изготовление приборов до 6 ГГц на традиционных монокристаллических подложках в теории возможно с применением электроннолучевой литографии, но найдет ли это широкое применение из-за сложности технологии, высокой цены производства и степени надежности? Чем выше частота, тем больше потери на распространение (в итоге растут вносимые потери), тем выше требования к поверхности подложки. Требуется

довольно тонкие и равномерные слои металлизации. Возникнут серьезные ограничения по допустимой мощности, подаваемой на устройство. В этом отношении конкурирующие технологии [26] на ОАВ, микроволновые фильтры диапазоне 5-6 ГГц заметно выигрывают по совокупности параметров.

Методика, предложенная в работе по изучению свойств и параметров ПАВ высших гармоник, является универсальной. С использованием вычисленных параметров и модели связанных мод, основанной на формализации с использованием P -матриц, возможно провести расчет устройства на частоте 5-6 ГГц, поскольку все вторичные эффекты, потери на распространения, резистивные потери, утечка в объем добавляются при расчете МСМ.

Назовем ограничения в применении данной методики.

1. Так как тестовые структуры анализируются с использованием периодических условий по апертуре, не учитываются факторы, такие как дифракция и волноводный эффект. Следователь-

Частоты гармоник в зависимости от типа преобразователя и материала

Table 1. Harmonic frequencies depending on the transducer type and material

Тип преобразователя / Transducer type	Материал (тип волны) / Material (type of wave)	Частота основной гармоники / Main harmonic frequency, GHz	Частота 3-й гармоники / 3rd harmonic frequency, GHz
Эквидистантный ВШП (рис. 8, а) / equidistant IDT (Fig. 8, a)	LiNbO ₃ , 128°Y-X (волна Рэлея / Rayleigh wave)	2.84	–
	Quartz, 36°Y-X+90° (wave STW)	3.57	–
ВШП с расщепленными электродами (рис. 8, б) / IDT with split electrodes (Fig. 8, b)	LiNbO ₃ , 128°Y-X (волна Рэлея / Rayleigh wave)	1.4	4.2
	Quartz, 36°Y-X+90° (wave STW)	1.78	5.34

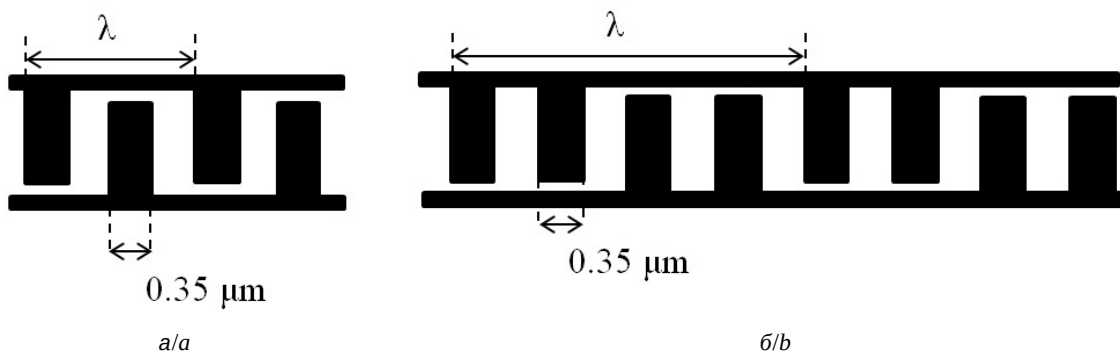


Рис. 8. Типы ВШП: а – эквидистантный ВШП с шириной электрода $\lambda/4$, б – ВШП с расщепленными электродами с шириной электрода $\lambda/8$

Fig. 8. Types of IDT: a – equidistant IDT with electrode width $\lambda/4$, b – IDT with split electrodes with electrode width $\lambda/8$



но, полученные результаты будут применимы при значениях апертуры, превышающих 10 длин волн. При апертурах менее 8–10 длин волн начинает проявляться волноводный эффект, требующий учета нескольких акустических мод с соответствующими параметрами ПАВ для каждой из них.

2. Представленный в работе расчет в COMSOL построен таким образом, что не привлекаются такие параметры, как резистивные потери и вязкостные потери на распространение, но данный вид потерь легко и удобно добавлять непосредственно в МСМ.

Заключение

Демонстрируется подход по расчету параметров ПАВ методом конечных элементов для быстрой аналитической модели связанных мод. Показано, что кроме основной акустической моды для расщепленных электродов присутствуют еще гармоники высших порядков. Предложенный алгоритм позволяет рассчитать параметры ПАВ каждой из гармоник и учитывать их при быстрых расчетах. Рассчитанные параметры могут быть применены при проектировании фильтров и линий задержек, включающих преобразователи с расщепленными электродами. Сравнение результатов расчета двух устройств с экспериментом продемонстрировало высокую степень соответствия АЧХ устройств.

Численный анализ основных параметров акустических волн, применение модели связанных мод и матричного подхода в формализации вычислений предоставляют разработчикам эффективный и гибко адаптируемый инструмент для расчета характеристик акустоэлектронных устройств с учетом возможных изменений в их топологии.

Список литературы

1. Багдасарян А., Сеницына Т., Машинин О., Иванов П., Егоров Р. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации // *Электроника : наука, технология, бизнес*. 2013. № 8. С. 128–136.
2. Туральчук П. А., Вендик И. Б. Синтез полосовых фильтров на объемных акустических волнах с учетом материальных параметров многослойной структуры резонаторов // *Акустический журнал*. 2022. Т. 68, № 6. С. 611–617. <https://doi.org/10.31857/S0320791922050124>
3. Гуляев Ю. В., Сучков С. Г., Янкин С. С., Никитов С. А., Сучков Д. С., Плесский В. П. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 6 ГГц // *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60, № 4. С. 429–432. <https://doi.org/10.7868/S0033849415040087>

4. Дорохов С. П. Многопараметрический транспондер на основе пассивной радиометки на поверхностных акустических волнах // *Датчики и системы*. 2018. № 11. С. 35–41.
5. Анцев И. Г., Богословский С. В. Эволюция систем мониторинга на основе меток и датчиков на поверхностных акустических волнах // *Инновации*. 2015. № 12. С. 115–122.
6. Елисеев Н. Перспективные ПАВ-датчики Transense / Honeywell // *Электроника : Наука, Технология, Бизнес*. 2008. № 1. С. 40–45.
7. Лойко В. А., Добровольский А. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 3. С. 6–21. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21>
8. Веремеев И. В., Добриштейн С. А., Разгоняев В. К. Моделирование ПАВ-резонаторов и лестничных ПАВ-фильтров методом Р-матриц // *Техника радиосвязи*. 2018. № 3 (38). С. 61–71.
9. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.
10. Койгеров А. С. Аналитический подход к расчету резонаторного комбинированного фильтра на поверхностных акустических волнах на основе модели связанных мод // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 2. С. 16–28. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28>
11. Кузнецова И. Е., Смирнов А. В., Плеханова Ю. В., Решетилов А. Н., Ван Г.-Ц. Влияние апертуры встречно-штыревого преобразователя на характеристики его выходного сигнала в пьезоэлектрической пластине // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84, № 6. С. 790–793. <https://doi.org/10.31857/S0367676520060162>
12. Тимошенко П. Е., Широков В. Б., Калинин В. В. Конечно-элементное моделирование характеристик ПАВ-фильтров на основе тонких пленок титаната бария стронция // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. 2020. Т. 17, № 4. С. 48–56. <https://doi.org/10.31429/vestnik-17-4-48-56>
13. Квашинин Г. М., Сорокин Б. П., Бурков С. И. Анализ распространения СВЧ волн Лэмба в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // *Акустический журнал*. 2021. Т. 67, № 6. С. 595–602. <https://doi.org/10.31857/S0320791921060058>
14. Campbell C. K. Obtaining the fundamental and harmonic radiation conductances of a reflective SAW interdigital transducer // *1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*. 1998. Vol. 1. P. 169–173. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762124>
15. Asakawa S., Suzuki M., Kakio S., Tezuka A., Mizuno J. Resonance Properties of Leaky SAW Harmonics on Bonded Dissimilar-Material Structures // *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. 2020. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251535>
16. Sato T., Otsuka S., Okajima H., Motegi R. Experimental investigation on the operation of SAW devices at harmonic frequencies with stepped-finger interdigital transducer // *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*. 1996.



- Vol. 1. P. 267–270. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1996.583971>
17. Huegli R. GHz filters with third harmonic unidirectional transducers // IEEE Symposium on Ultrasonics. 1990. Vol. 1. P. 165–168. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1990.171345>
18. Chen Y., Wu T., Chang K. A COM Analysis of SAW Tags Operating at Harmonic Frequencies // 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 2007. P. 2347–2350. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.590>
19. Hikita M., Kato Y., Matsuda J., Watanabe T., Nakano A. Self-temperature-compensation characteristics at 1st- and 3rd-harmonic frequencies for SAW gas sensor used in sensor network // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2496–2499. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2009.5441984>
20. Chauhan V., Weigel R., Hagelauer A., Mayer M., Ruile W., Moellenbeck D., Ebner T., Wagner K. C., Bleyl I., Mayer E., Mayer A. A Nonlinear FEM Model to Calculate Third-Order Harmonic and Intermodulation in TC-SAW Devices // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580153>
21. Койгеров А. С., Бальшиева О. Л. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэлея для модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 67–79. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79>
22. Tikka A., Al-Sarawi S., Abbott D. Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis // Sensors & Transducers J. 2008. Vol. 95, iss. 8. P. 26–39.
23. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press, 2010. 448 p.
24. Аристархов Г. М., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Зайченко К. В., Комаров В. В., Воробьев А. В., Звездинов Н. В., Исаев В. М., Кабанов И. Н., Кац Б. М., Корчагин А. И., Мещанов В. П. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
25. Синицына Т. В. Методы моделирования высокоизбирательных устройств частотной селекции на поверхностных акустических волнах: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М., 2019. 31 с.
26. Liu Y., Cai Y., Zhang Y., Tovstopyat A., Liu S., Sun C. Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review // Micromachines. 2020. Vol. 11. P. 630. <https://doi.org/10.3390/mi11070630>
- Acoust. Phys., 2022, vol. 68, pp. 569–574. <https://doi.org/10.1134/S106377102205016>
3. Gulyaev Y. V., Nikitov S. A., Suchkov S. G., Yankin S. S., Suchkov D. S., Plessky V. P. SAW Radio Frequency Identification Tag for the 6 GHz Band. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2015, vol. 60, pp. 402–405. <https://doi.org/10.1134/S1064226915040087>
4. Dorokhov S. P. Multivariable transponder based on the passive RFID-tag by surface acoustic waves. *Sensors and Systems*, 2018, no. 11 (230), pp. 35–41 (in Russian).
5. Antcev I. G., Bogoslovsky S. V. Development of monitoring systems on the basis of tags and sensors based on surface acoustic waves. *Innovations*, 2015, no. 12, pp. 115–122 (in Russian).
6. Eliseev N. Transense/Honeywell’s advanced SAW sensors. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2008, no. 1, pp. 40–45 (in Russian).
7. Loiko V. A., Dobrovolsky A. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review). *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 6–21 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21>
8. Veremeev I. V., Dobershtein S. A., Razgonyaev V. K. P-Matrix Modeling of Saw Resonators and Ladder-Type Saw Filters. *Radio Communication Technology*, 2018, iss. 3 (38), pp. 61–71 (in Russian). <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2018-38-61-71>
9. Dmitriev V. F. Modified equations of coupled surface acoustic waves. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086. <https://doi.org/10.1134/S1064226909090137>
10. Koigerov A. S. Analytical Approach to Designing a Combined-Mode Resonator Filter on Surface Acoustic Waves Using the Model of Coupling of Modes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 16–28 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28>
11. Kuznetsova I. E., Smirnov A. V., Plekhanova Y. V., Reshetilov A. N., Wang G.-J. Effect of the aperture interdigital transducer on the characteristics of its output signal in a piezoelectric plate. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, no. 6, pp. 644–647. <https://doi.org/10.3103/S1062873820060143>
12. Timoshenko P. E., Shirokov V. B., Kalinchuk V. V. Finite-element modeling of SAW-filters based on thin films of barium strontium titanate. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 48–56 (in Russian).
13. Kvashnin G. M., Sorokin B. P., Burkov S. I. Study of propagation of microwave lamb waves in a piezoelectric layered structure. *Acoust. Phys.*, 2021, vol. 67, pp. 590–596. <https://doi.org/10.1134/S1063771021060051>
14. Campbell C. K. Obtaining the fundamental and harmonic radiation conductances of a reflective SAW interdigital transducer. *1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, 1998, vol. 1, pp. 169–173. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762124>

References

1. Bagdasaryan A., Sinitzina T., Mashinin O., Ivanov P., Egorov R. SAW frequency selection devices for modern communication, radiolocation and telecommunication systems. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2013, no. 8, pp. 128–136 (in Russian).
2. Turalchuk P. A., Vendik I. B. Synthesis of the bulk-acoustic-wave bandpass filters taking into account the material parameters of the resonators multilayer structure.



15. Asakawa S., Suzuki M., Kakio S., Tezuka A., Mizuno J. Resonance Properties of Leaky SAW Harmonics on Bonded Dissimilar-Material Structures. *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2020, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251535>
16. Sato T., Otsuka S., Okajima H., Motegi R. Experimental investigation on the operation of SAW devices at harmonic frequencies with stepped-finger interdigital transducer. *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, 1996, vol. 1, pp. 267–270. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1996.583971>
17. Huegli R. GHz filters with third harmonic unidirectional transducers. *IEEE Symposium on Ultrasonics*, 1990, vol. 1, pp. 165–168. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1990.171345>
18. Chen Y., Wu T., Chang K. A COM Analysis of SAW Tags Operating at Harmonic Frequencies. *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2007, pp. 2347–2350. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.590>
19. Hikita M., Kato Y., Matsuda J., Watanabe T., Nakano A. Self-temperature-compensation characteristics at 1st- and 3rd-harmonic frequencies for SAW gas sensor used in sensor network. *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2009, pp. 2496–2499. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2009.5441984>
20. Chauhan V., Weigel R., Hagelauer A., Mayer M., Ruile W., Moellenbeck D., Ebner T., Wagner K. C., Bleyl I., Mayer E., Mayer A. A Nonlinear FEM Model to Calculate Third-Order Harmonic and Intermodulation in TC-SAW Devices. *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2018, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580153>
21. Koigerov A. S., Balysheva O. L. Rapid Numerical Calculation of Rayleigh Surface Acoustic Wave Parameters for a Model of Coupling Modes. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 5, pp. 67–79 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79>
22. Tikka A., Al-Sarawi S., Abbott D. Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis. *Sensors & Transducers J.*, 2008, vol. 95, iss. 8, pp. 26–39.
23. Morgan D. *Surface Acoustic Wave Filters with Applications to Electronic Communications and Signal Processing*. Academic Press, 2010. 448 p.
24. Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F., Zaichenko K. V., Komarov V. V., Vorob'yov A. V., Zvezdinov N. V., Isaev V. M., Kabanov I. N., Kats B. M., Korchagin A. I., Meshchanov V. P. *Fil'tratsiya i spektral'nyi analiz radiosignalov. Algoritmy. Struktury. Ustroystva* [Gulyaev Yu. V., ed. Filtering and Spectral Analysis of Radio Signals. Algorithms. Structures. Devices]. Moscow, Radiotekhnika, 2020. 504 p. (in Russian).
25. Sinitzina T. V. *Metody modelirovaniya vysokoizbiratel'nykh ustroystv chastotnoi selektsii na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh. Dis. doct. tekhn. nauk* [Modeling methods for highly selective frequency selection devices based on surface acoustic waves: Thesis Diss. Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow, 2019. 31 p. (in Russian).
26. Liu Y., Cai Y., Zhang Y., Tovstopyat A., Liu S., Sun C. Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review. *Micromachines*, 2020, vol. 11, pp. 630. <https://doi.org/10.3390/mi11070630>

Поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 12.10.2023
 The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 03.10.2023; accepted for publication 12.10.2023



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 76–87

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 76–87

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

Научная статья

УДК 537.876.4



Каналирование поверхностных магнитостатических волн с помощью декорирования металлами поверхности плёнок ферритов

В. К. Сахаров^{1,2}, Ю. В. Хивинцев^{1,2}✉, А. С. Джумалиев¹, Ю. В. Никулин^{1,2}, А. В. Кожевников¹, Ю. А. Филимонов^{1,2}

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Сахаров Валентин Константинович, кандидат физико-математических наук, ¹старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, valentin@sakharov.info, <https://orcid.org/0000-0001-7168-1198>

Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ¹ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, khivintsev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6228-7428>

Джумалиев Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, dzhas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5242-3369>

Никулин Юрий Васильевич, кандидат физико-математических наук, ¹старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ; ²доцент кафедры технологии материалов, ynikulin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>

Кожевников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ, kzhavl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8904-475X>

Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹директор; ²профессор кафедры технологии материалов, yuri.a.filimonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2645-6669>

Аннотация. Представлены экспериментальные результаты по особенностям прохождения поверхностной магнитостатической волны в плёнке железо-иттриевого граната, на поверхности которой сформированы каналы в металлических декорациях из хрома и пермаллоя. Обсуждается влияние толщины металлических декораций, наличия у них магнитных свойств, а также ширины образуемого канала на вид амплитудно-частотных характеристик прошедшего через микроструктуры сигнала. Показывается возможность каналирования поверхностной магнитостатической волны для случая декораций из плёнки пермаллоя толщиной 30 нм и плёнки хрома толщиной 1.5 мкм. Данные микроструктуры при ширине канала в 200 мкм демонстрируют эффект «просветления» в амплитудно-частотных характеристиках коэффициента передачи поверхностной магнитостатической волны.

Ключевые слова: магнитостатические волны, железо-иттриевый гранат, декорированные поверхности, каналирование, микроантенны

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00563).

Для цитирования: Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А. Каналирование поверхностных магнитостатических волн с помощью декорирования металлами поверхности плёнок ферритов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 76–87. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Channeling of magnetostatic surface waves by decoration of ferrite films with metals

V. K. Sakharov^{1,2}, Y. V. Khivintsev^{1,2}✉, A. S. Dzhumaliev^{1,2}, Y. V. Nikulin^{1,2}, A. V. Kozhevnikov¹, Y. A. Filimonov^{1,2}

¹Saratov Branch of the Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 38 Zelyonaya St., Saratov 410019, Russia

²Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Valentin K. Sakharov, valentin@sakharov.info, <https://orcid.org/0000-0001-7168-1198>

Yuri V. Khivintsev, khivintsev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6228-7428>

Alexandr S. Dzhumaliev, dzhas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5242-3369>

Yuri V. Nikulin, ynikulin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2957-5468>

Alexander V. Kozhevnikov, kzhavl@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8904-475X>

Yuri A. Filimonov, yuri.a.filimonov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2645-6669>

© Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Филимонов Ю. А., 2024



Abstract. Background and Objectives: One of the main tasks for developing magnonic devices is to form and control spin wave beams. For this purpose, the decoration of ferrite films with magnetic or non-magnetic metal areas can be used. The aim of this work is to study the peculiarities of magnetostatic surface wave (MSSW) propagation in the channels formed in yttrium-iron garnet (YIG) films by deposition of 1.5 μm thick metal decorations from chromium (Cr) and permalloy (Py). **Materials and Methods:** Studied samples were fabricated on the base of 6.5 μm -thick epitaxial YIG film by the DC magnetron sputtering, photolithography, and ion etching techniques. Frequency dependencies of magnitude and phase of the transmitted MSSW signal at different applied magnetic field were measured with the help of a vector network analyzer and a microwave probe station. Calculation of the dispersions and insertion losses for MSSW propagating in the metallized YIG film was performed on the basis of Maxwell's equations in the magnetostatic approximation, the Landau-Lifshitz equation, and standard electrodynamic boundary conditions. **Results and Conclusion:** The optimal channel width w relative to the antenna aperture providing channeling of the MSSW signal with the possibility of "antireflective effect" for the transmitted signal has been found to be $w = 200 \mu\text{m}$. It has been shown that for the formation of channeling effect, one needs to use a non-magnetic metal with the thickness leading to a transition to the "metallic" branch of the MSSW dispersion or a magnetic metal with the thickness resulting in bending of a short-wavelength part of MSSW dispersion. For the studied samples, it is $d(\text{Cr}) = 1.5 \mu\text{m}$ and $d(\text{Py}) = 30 \text{ nm}$, respectively. The obtained results demonstrate the possibility of using the channels in metallic decorations for the formation of directed spin wave beams.

Keywords: magnetostatic waves, yttrium-iron garnet, decorated surfaces, channeling, microantennas

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00563).

For citation: Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Dzhumaliev A., Nikulin Y. V., Kozhevnikov A. V., Filimonov Y. A. Channeling of magnetostatic surface waves by decoration of ferrite films with metals. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 76–87 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-76-87>, EDN: OACSTN

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Применение спиновых волн (СВ) в качестве переносчиков информации потенциально может увеличить энергоэффективность и рабочие частоты создаваемых на их основе устройств по сравнению с устройствами микроэлектроники за счёт отсутствия переноса заряда [1]. Активные исследования в этой области ознаменовали появление магноники [2–4]. Обеспечение требуемой функциональности устройств магноники невозможно без наличия методов эффективного формирования пучков СВ и управления их распространением. По этой причине постоянно идёт поиск и развитие таких способов. Наиболее распространённым и изученным методом остаётся непосредственное вытравливание плёночных волноводов [5–7]. Среди других способов можно выделить фокусировку СВ преобразователями сложной формы [8–10], использование рельефа подложек [11, 12], неоднородной конфигурации внешних полей [13, 14], а также декорирование поверхности плёнок ферритов магнитными и немагнитными металлами [15–17]. Последний метод обладает несколькими положительными особенностями. Во-первых, его технологически проще реализовать по сравнению с другими перечисленными методами. Во-вторых, декорирование обладает довольно широкими возможностями подстройки: в зависимости от толщины металла и его проводимости можно варьировать вносимые потери на распространение СВ [18], переход на одну или вторую «ветку» дисперсионной кривой в случае поверхностных магнитоэлектронных волн (ПМСВ) [19]. Кроме того,

наличие магнитных свойств у металлических декораций существенно видоизменяет дисперсионные кривые ПМСВ и распределения полей в нижележащем слое феррита. В этом случае на границе двух магнитных слоёв формируется так называемая внутренняя ПМСВ [20–22].

Ранее было проведено экспериментальное сравнение особенностей распространения ПМСВ в плёнке железо-иттриевого граната (ЖИГ) через каналы, сформированные за счёт декораций из «тонких» (30–50 нм) – толщиной много меньшей глубины скин-слоя – немагнитного и магнитного металлов [16, 17]. В случае отсутствия магнитных свойств «тонкий» металл не изменяет дисперсии ПМСВ в нижележащей плёнке ЖИГ, однако увеличивает потери ПМСВ под металлом. Было показано, что наличие магнитной составляющей у металлических декораций, образующих канал, может улучшать прохождение ПМСВ по сравнению со свободной плёнкой ЖИГ и каналами в немагнитных декорациях за счёт изменения дисперсии ПМСВ и формирования неоднородного магнитного поля. Особенно сильно этот эффект проявляется вблизи коротковолновой границы спектра ПМСВ для свободной плёнки ЖИГ, на частотах, на которых ПМСВ под магнитным металлом не существует.

Цель представляемой работы состоит в изучении особенностей распространения ПМСВ в каналах, сформированных в плёнках ЖИГ декорированием их поверхностей «толстыми» ($\approx 1.5 \mu\text{m}$) – толщиной порядка глубины скин-слоя – плёнками металлов, которые приводят к переходу дисперсии ПМСВ, распространяю-



щейся в нижележащем слое ЖИГ, на ветку, соответствующую покрытию «идеальным» металлом. Так же как и в [17], в данной работе использовались два металла с близкой удельной проводимостью: магнитный – пермаллой (Py) и немагнитный – хром (Cr).

1. Методы и материалы

Исследуемые структуры, схематическое изображение и микрофотографии которых показаны на рис. 1, изготавливались на основе эпитаксиальной плёнки ЖИГ на подложке гадолиний галлиевого граната (ГГГ). Эффективная намагниченность $4\pi M$ плёнки ЖИГ составляла 1830 Гс, толщина – $d(\text{YIG}) = 6.5$ мкм. Формирование декораций из Py и Cr, а также нанесение медных микроантенн (МА) и контактных площадок к ним осуществлялось с помощью методов магнетронного распыления на постоянном токе, фотолитографии и последующего ионного травления, аналогично работам [16, 17].

Эксперименты проводились с двумя наборами микроструктур. В первом толщина d элементов из Py и Cr составляла ≈ 1.5 мкм, а во втором наборе – ≈ 30 нм. Измеренное четырёхзондовым методом удельное сопротивление ρ используемых металлов составляло $\rho(\text{Cr}) \approx 0.17$ и $\rho(\text{Py}) \approx 0.11$ мкОм·м для структур с $d \approx 1.5$ мкм и $\rho(\text{Cr}) \approx 0.61$ и $\rho(\text{Py}) \approx 0.73$ мкОм·м для структур с $d \approx 30$ нм. Каналы, сформированные из данных металлов на поверхности плёнки ЖИГ, имели ширину $w = 50, 100$ и 200 мкм. Помимо этого,

для целей сравнения рассматривались структуры без декораций между МА («свободная» плёнка ЖИГ) и полностью металлизированная поверхность плёнки ЖИГ между входной и выходной антеннами ($w = 0$ мкм). Каждый набор микроструктур с одной толщиной декораций изготавливался на отдельной пластине ЖИГ/ГГГ размером $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$. При этом расстояние между соседними микроструктурами на одной пластине составляло ≈ 0.8 мм. Отметим, что особенности прохождения ПМСВ в структурах с толщиной металла ≈ 30 нм ранее обсуждались [17], в данной работе приводятся дополнительные данные по этим структурам в целях сравнения со структурами на основе «толстых» металлов.

Медные МА и контактные площадки имели толщину ≈ 850 нм. Ширина используемых МА составляла $w_{ma} = 4$ мкм, а длина (апертура) – $l_{ma} = 250$ мкм. Это приводило к возможности возбуждения ПМСВ с волновыми числами $k \leq \pi/w_{ma} \approx 8000$ рад/см. Расстояние между входной и выходной антеннами было $L = 820$ мкм для всех изучаемых структур.

Изготовленные структуры помещались между полюсами электромагнита, и к контактным площадкам от МА прижимались СВЧ-зонды, соединённые с векторным анализатором цепей коаксиальным трактом. При внешнем магнитном поле H , приложенном в плоскости плёнки параллельно оси МА, что отвечало конфигурации ПМСВ [23], измерялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) – $|S_{12}(f)|$ и фазочастотные

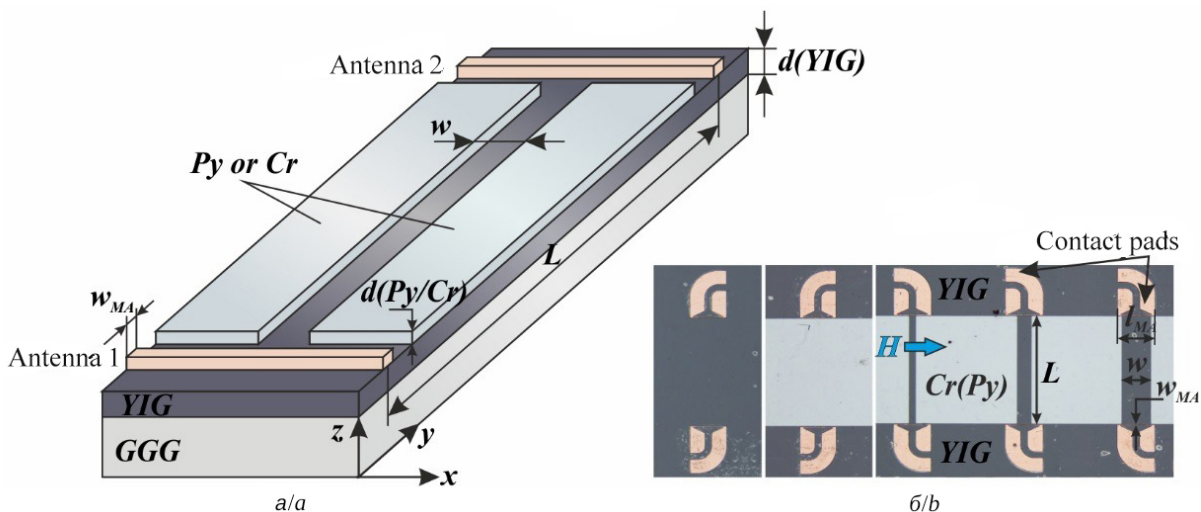


Рис. 1. Схематическое изображение (а) и микрофотографии (б) исследуемых структур (слева направо): свободный ЖИГ, металлизированный ЖИГ, канал в декорациях с шириной $w = 50, 100$ и 200 мкм (цвет онлайн)

Fig. 1. Schematic view (a) and microphotographs (b) of the studied structures (from left to right): free YIG, metallized YIG, channel in the decorations with the width $w = 50, 100$, and $200 \mu\text{m}$ (color online)



характеристики (ФЧХ) – $\phi(f)$ коэффициента передачи S_{12} , соответствующего ПМСВ, «прижатой» к поверхности с МА и металлическими декорациями. Из измеренных ФЧХ по стандартной процедуре [24] затем получались дисперсионные характеристики. Мощность сигнала P_{in} , подаваемого на входную МА, была меньше порога параметрической неустойчивости и составляла $P_{in} = -40$ дБм для диапазона $H = 0.12-0.81$ кЭ и $P_{in} = -25$ дБм для $H > 0.81$ кЭ.

Для анализа результатов измерений прохождения ПМСВ в микроструктурах с декорациями из Ру рассчитывалось равновесное распределение намагниченности и полного поля с использованием программы OOMMF 1.2b0 [25]. При этом в расчётах использовались параметры материалов, соответствующие исследуемым структурам, а именно эффективная намагниченность – $4\pi M(YIG) = 1830$ Гс, $4\pi M(Ru) = 9200$ Гс, обменная жесткость – $A_{ex}(YIG) = 3.13 \cdot 10^{-7}$ эрг/см, $A_{ex}(Ru) = 11.5 \cdot 10^{-7}$ эрг/см.

Для оценки потерь, вносимых конечной проводимостью и намагниченностью металлических слоёв и выражаемых мнимой частью волнового числа $k = k' - ik''$, был проведён их расчёт вместе с дисперсионными характеристиками $k(f)$ из уравнений Ландау – Лифшица и Максвелла аналогично работам [16, 26, 27].

2. Полученные результаты

2.1. Дисперсии и потери ПМСВ в металлизированных структурах

Измерения прохождения ПМСВ в металлизированных плёнках ЖИГ показывают, что металлизация из хрома с $d(Cr) = 30$ нм не приводит к изменению дисперсионных кривых, но вносит существенные потери – уровень прохождения значительно снижается по сравнению со свободной плёнкой ЖИГ (рис. 2). Расчёт показывает сильный рост потерь с увеличением волнового числа. По этой причине наблюдаемая в эксперименте зона прохождения ПМСВ сужается по сравнению со случаем свободной плёнки. По мере роста приложенного поля затухание сигнала в металлизированном ЖИГ увеличивается, зона прохождения сужается к длинноволновой границе ПМСВ – $f_0 - \gamma \cdot (H \cdot (H + 4\pi M))^{1/2}$, где $\gamma = 2.8$ МГц/Э.

Увеличение толщины плёнки хрома до $d(Cr) = 1.5$ мкм приводит к переходу дисперсии ПМСВ на ветку, соответствующую идеальной металлизации. Вносимые проводимостью нагрузки потери оказываются одного

порядка с потерями в свободной плёнке ЖИГ. Изменение наклона дисперсии вызывает рост групповой скорости и соответствующее уменьшение потерь на распространение, в особенности в длинноволновой области, за счёт чего прохождение вблизи f_0 превышает величину прошедшего сигнала для свободной плёнки ЖИГ. С увеличением приложенного поля затухание сигнала становится меньше, зона прохождения ПМСВ становится шире. При $H = 120$ Э в большей части зоны прохождения, за исключением длинноволновой области, сигнал для $d(Cr) = 1.5$ мкм оказывался меньше образца с $d(Cr) = 30$ нм. При $H \approx 320$ Э уровень прохождения в центральной части зоны прохождения выравнивался для обоих случаев, но при этом ширина зоны прохождения для $d(Cr) = 1.5$ мкм превышала на 150 МГц ширину зоны для $d(Cr) = 30$ нм и выравнивалась с шириной зоны для свободной плёнки. При $H > 320$ Э уровень проходящего сигнала ПМСВ для $d(Cr) = 1.5$ мкм уже оказывался больше случая $d(Cr) = 30$ нм, а ширина зоны – больше случая свободной плёнки. Последний факт связан с тем, что коротковолновая граница ПМСВ в металлизированных плёнках $f_{sm} = \gamma(H + 4\pi M)$ оказывается больше случая свободной плёнки $f_s = \gamma(H + 4\pi M/2)$. Стоит отметить, что авторам неизвестно о каких-либо работах, где описывается экспериментальное наблюдение прохождения ПМСВ в интегральных тонкоплёночных структурах на основе ЖИГ на частотах выше f_s . Для исследуемых структур МА находятся на свободном участке плёнки ЖИГ, и наблюдение прохождения ПМСВ выше f_s , по видимому, связано с близостью МА к металлизированному участку – возбуждающее поле от МА «дотягивается» до металлизированного участка и эффективно возбуждает ПМСВ непосредственно под ним.

В случае металлизации плёнки ЖИГ пермаллоем с $d(Ru) = 30$ нм дисперсионные кривые отклонялись от случая свободной плёнки ЖИГ по мере перехода в коротковолновую область (см. рис. 2) с одновременным значительным увеличением потерь. Такое поведение дисперсии обусловлено магнитными свойствами Ру и аналогично поведению внутренней ПМСВ в случае двухслойных структур [21]. Коротковолновая граница f_{int} для внутренней ПМСВ оказывается меньше f_s . Таким образом, имеется некоторый частотный диапазон $[f_{int}, f_s]$, в котором ПМСВ не распространяется под металлом.

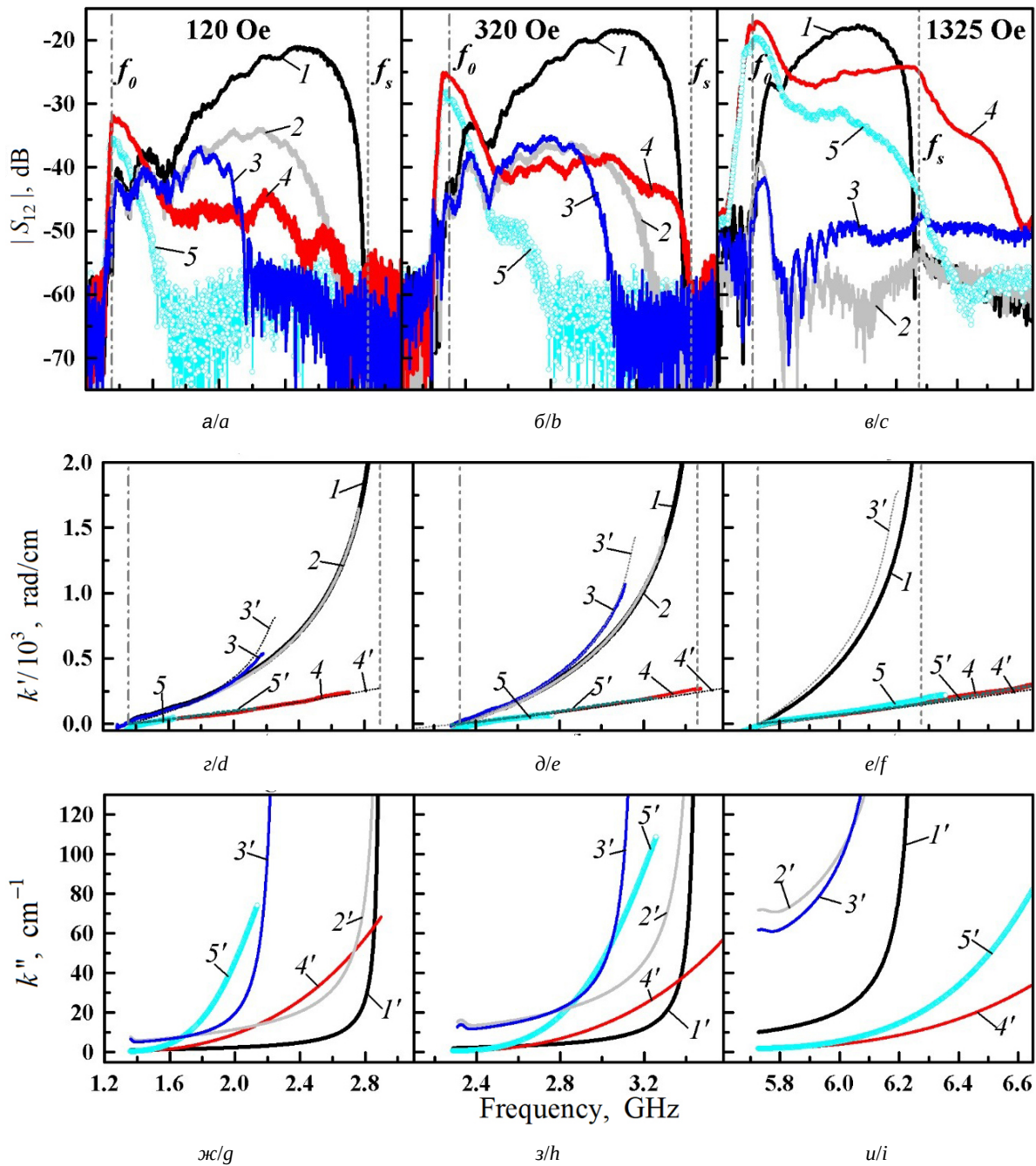


Рис. 2. АЧХ коэффициента передачи (а, б, в), дисперсионные кривые (г, д, е) и вносимые потери (ж, з, и) в свободной плёнке ЖИГ (кривые 1), плёнке ЖИГ, металлизированной хромом толщиной $d(\text{Cr})=30$ нм (кривые 2), $d(\text{Cr})=1.5$ мкм (кривые 4), либо пермаллоем толщиной $d(\text{Py})=30$ нм (кривые 3), $d(\text{Py})=1.5$ мкм (кривые 5) при приложенном поле: а, г, ж – 120 Э; б, д, з – 320 Э; в, е, и – 1325 Э. Кривые со штрихом соответствуют рассчитанным данным, без штриха – экспериментальным. Вертикальная штрихпунктирная линия показывает положение длинноволновой границы ПМСВ f_0 ; вертикальная пунктирная – положение коротковолновой границы ПМСВ для свободной пленки ЖИГ – f_s (цвет онлайн)

Fig. 2. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient (a, b, c), dispersion curves (d, e, f) and insertion losses (g, h, i) in the free YIG (curves 1), YIG film metallized by chromium with the thickness $d(\text{Cr})=30$ nm (curves 2), $d(\text{Cr})=1.5$ μm (curves 4), or by permalloy with the thickness $d(\text{Py})=30$ nm (curves 3), $d(\text{Py})=1.5$ μm (curves 5) at the applied field: a, d, g – 120 Oe; b, e, h – 320 Oe, c, f, i – 1325 Oe. The curves with the apostrophe correspond to the calculated data, ones without the apostrophe – to the experimental data. The vertical dash-dotted line shows the position of the MSSW long-wavelength boundary f_0 ; the vertical dotted line – the position of the MSSW short-wavelength boundary for the free YIG – f_s (color online)



Увеличение толщины металлизации пермаллоя до $d(Py) = 1.5 \mu\text{m}$ переводило дисперсионную кривую на «металлическую» ветку, как и для случая хрома. При этом прохождение возможно было наблюдать только в узкой полосе (около 300 МГц) вблизи границы f_0 . По мере увеличения приложенного поля АЧХ коэффициента прохождения становилась шире, как и для хрома, за счёт снижения потерь, однако ширина зоны прохождения оставалась меньше случая металлизации из хрома. При $H \approx 1325 \text{ Э}$ зона прохождения занимала область от f_0 до f_s .

2.2. АЧХ коэффициента передачи ПМСВ в каналах из декораций

Измеренные АЧХ коэффициента передачи ПМСВ в каналах из декораций показаны

на рис. 3, 4. Учитывая, что длина МА для каналов различной ширины была одинаковой ($l_{ma} = 250 \mu\text{m}$), волна, возбуждаемая входной антенной и поступающая на канал в декорациях, разделялась на три составляющие, одна из которых распространялась по каналу, а две другие – под слоем металла с обеих сторон от канала. С уменьшением ширины канала при постоянной длине антенн доля волны, распространяющейся под металлом, увеличивалась. Для случая хрома с $d(Cr) = 30 \text{ nm}$, который, как было показано выше, не изменяет дисперсию ПМСВ, влияние металла сводилось к подавлению ПМСВ под металлическими областями по обе стороны от канала. Поэтому кривые $|S_{12}(f)|$ с уменьшением ширины канала демонстрировали постепенное уменьшение прохождения (см. рис. 3, а),

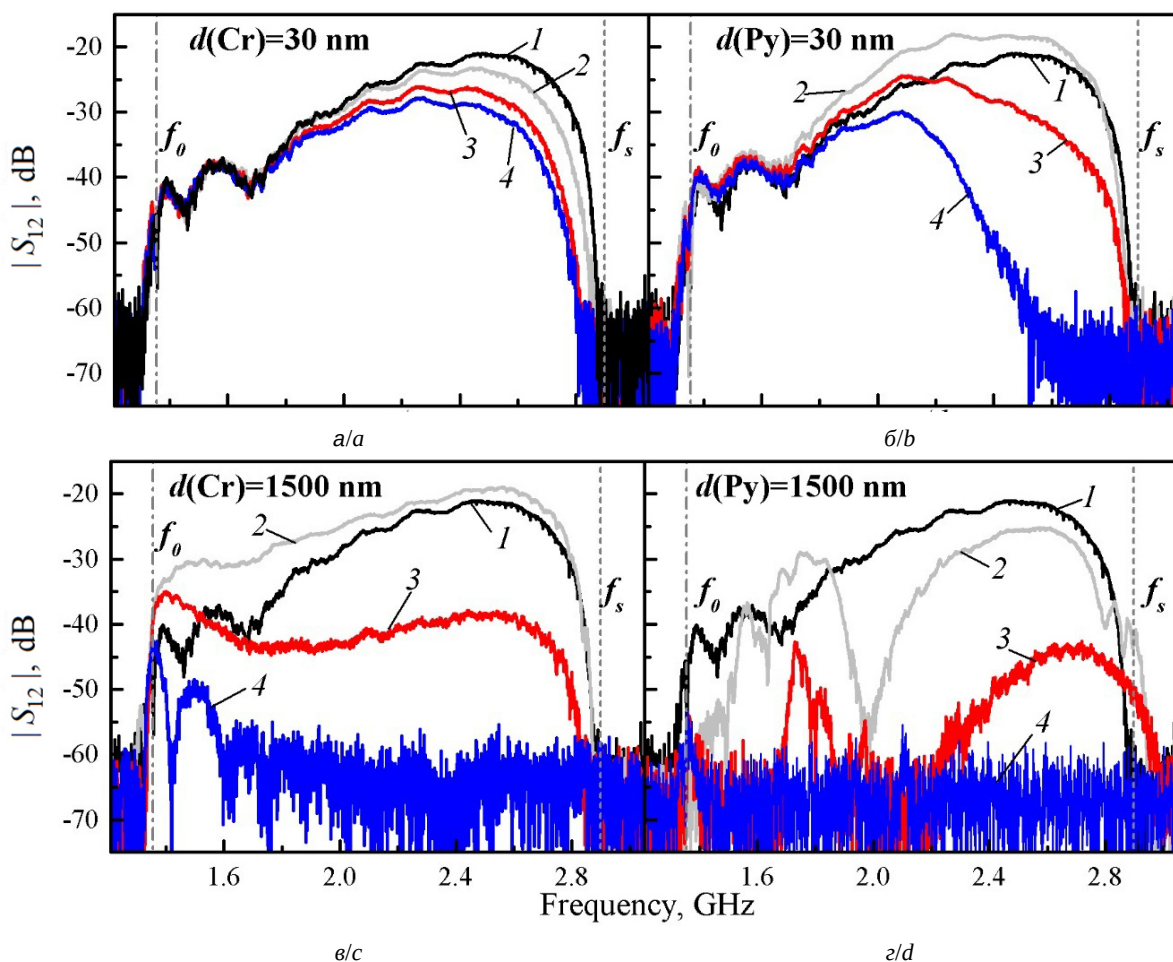


Рис. 3. АЧХ коэффициента передачи $|S_{12}(f)|$ ПМСВ в каналах из декораций: а, в – хрома, б, г – пермаллоя с толщинами: а, б – 30 нм, в, г – 1.5 мкм и шириной: кривая 2 – 200 мкм, кривая 3 – 100 мкм, кривая 4 – 50 мкм. Кривая 1 показывает АЧХ в свободной плёнке ЖИГ. Приложенное поле $H = 120 \text{ Э}$ (цвет онлайн)

Fig. 3. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient for MSSW in the decoration channels from: а, с – chromium, б, д – permalloy with the thickness: а, б – 30 nm, с, д – 1.5 μm and the width: curve 2 – 200 μm , curve 3 – 100 μm , curve 4 – 50 μm . Curve 1 shows $|S_{12}(f)|$ in the free YIG. Applied field $H = 120 \text{ Oe}$ (color online)

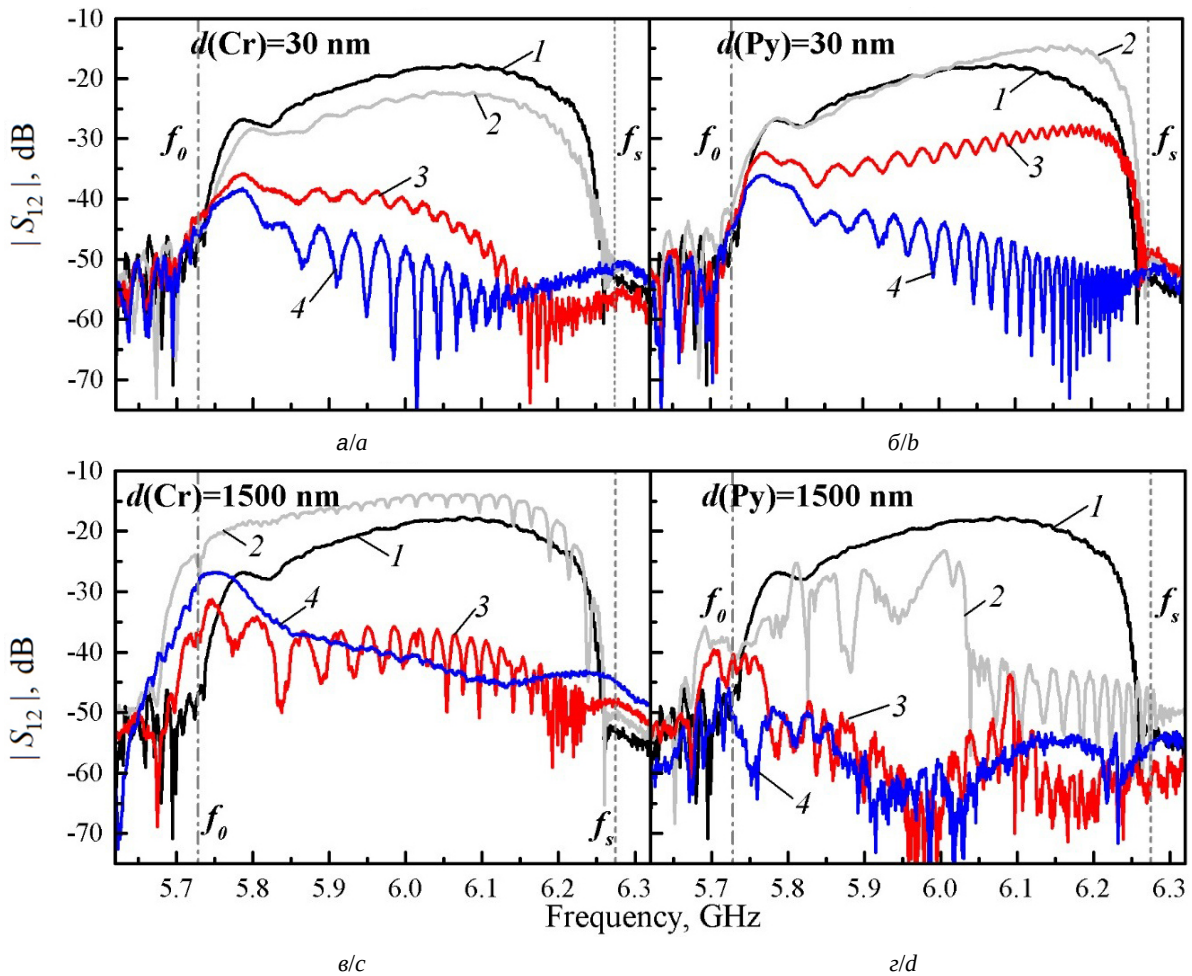


Рис. 4. АЧХ коэффициента передачи $|S_{12}(f)|$ ПМСВ в каналах из декораций: а, в – хрома, б, г – пермаллоя с толщинами: а, б – 30 нм, в, г – 1.5 мкм и шириной: кривая 2 – 200 мкм, кривая 3 – 100 мкм, кривая 4 – 50 мкм. Кривая 1 показывает АЧХ в свободной плёнке ЖИГ. Приложенное поле $H = 1325$ Э (цвет онлайн)

Fig. 4. Amplitude-frequency dependencies of the transmission coefficient for MSSW in the decoration channels from: а, в – chromium, б, г – permalloy with the thickness: а, б – 30 nm, в, г – 1.5 μm and the width: curve 2 – 200 μm , curve 3 – 100 μm , curve 4 – 50 μm . Curve 1 shows $|S_{12}(f)|$ in the free YIG. Applied field $H = 1325$ Oe (color online)

в особенности в коротковолновой области, для которой влияние вносимых потерь больше (см. рис. 2, ж). С ростом поля ухудшалось прохождение через структуры с каналами по сравнению со свободной плёнкой, а также увеличивалась разница в АЧХ для разных ширины канала (ср. рис. 3, а и рис. 4, а) – например, если для $H = 120$ Э различие в уровнях сигнала для $w = 200$ мкм и $w = 100$ мкм на максимумах прохождения составляло около 5 дБ, то при $H = 1325$ Э эта разница уже превышала 20 дБ. Это свойство следует отнести к росту потерь под металлом с ростом поля (см. кривую 2' на рис. 2, ж и рис. 2, и)

Уровень электромагнитной наводки увеличивался с ростом частоты, вследствие чего заметно сказывалась интерференция с ней прошедше-

го сигнала, приводящая к появлению осцилляций на АЧХ, измеренных при высоких полях (рис. 4).

Переход на «металлическую» ветку дисперсии ПМСВ для $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм приводил к эффективному отражению волны на границе каналов, препятствующему дифракционному расплыванию волнового пучка и способствующему, тем самым, его «канализованию» к выходной антенне. О проявлении канализования или пространственного ограничения ширины пучка ПМСВ в поперечном сечении указывает то, что для канала с шириной $w = 200$ мкм АЧХ прошедшего сигнала демонстрировала меньшее затухание по сравнению со случаем свободной плёнки ЖИГ (см. рис. 3, в) – эффект «просветления». Данный эффект сохранялся с ростом поля (см. рис. 4, в). Можно видеть также, что



увеличивалась интенсивность осцилляций, соответствующих дипольно-обменным резонансам, на АЧХ сигнала, прошедшего через канал $w = 200$ мкм по сравнению со свободной плёнкой (см. рис. 4, в). Это, скорее всего, обусловлено закреплением спинов на границе покрытых и непокрытых декорациями участков плёнки ЖИГ, аналогично тому, как это делает травление поверхности [28].

В низких полях уменьшение ширины канала из $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм гораздо сильнее уменьшало амплитуду прошедшего сигнала по сравнению с каналом из $d(\text{Cr}) = 30$ нм (ср. рис. 3, а и рис. 3, в), и при $w = 50$ мкм почти по всей ширине спектра ПМСВ сигнал оказывался подавленным до уровня наводки – прохождение наблюдалось лишь в узкой полосе (≈ 300 МГц) частот вблизи f_0 .

Из этого можно заключить, что при $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм существует оптимальная ширина канала по отношению к апертуре антенны, которая способствует канализованию сигнала, и с уменьшением ширины канала от этого значения происходит подавление проходящего сигнала.

Стоит отметить, что зона прохождения ПМСВ в структурах с каналами из $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм была ограничена частотами существования ПМСВ $[f_0, f_s]$ в свободной плёнке (узкая область прохождения на частотах $f < f_0$ на рис. 4, в относится к обратным объёмным магнитостатическим волнам, возбуждаемым контактными площадками), даже в случае высоких полей, при которых в полностью металлизированных образцах наблюдалось прохождение на частотах $f > f_s$ (см. рис. 2, в). Это показывает, что наличие каналов в декорациях приводит к невозможности возбуждения под декорированными областями ПМСВ с частотами $f > f_s$ с помощью антенны, расположенной на свободном ЖИГ в 10 мкм от декораций, в то время как при отсутствии каналов такое возбуждение оказывается возможным.

Декорации из пермаллоя с $d(\text{Py}) = 30$ нм помимо вносимых потерь приводят к неоднородности магнитного поля по границам каналов, что видно из равновесного распределения поля (рис. 5), изменяют дисперсию ПМСВ в коротковолновой области по сравнению с ПМСВ в свободном ЖИГ (см. рис. 2, г, д, е) так, что формируется диапазон частот $[f_{int}, f_s]$, в котором распространение под металлом оказывается невозможным. В результате этого образуются

условия, препятствующие дифракционному расплыванию волнового пучка и, таким образом, приводящие к возникновению эффекта канализования при прохождении через канал, аналогично случаю канала из хрома с $d(\text{Cr}) = 1.5$ мкм. За счёт этого в канале с $w = 200$ мкм и $d(\text{Py}) = 30$ нм амплитуда прошедшего сигнала превышала уровень сигнала в свободной плёнке ЖИГ (см. рис. 3, б и рис. 4, б). Невозможность распространения ПМСВ под декорациями из пермаллоя в диапазоне частот $[f_{int}, f_s]$ и рост вносимых металлизацией потерь в длинноволновой области АЧХ с увеличением поля приводит к ещё одному проявлению эффекта канализования – формированию максимума прохождения в коротковолновой области АЧХ в высоких полях (кривые 2 и 3 на рис. 4, б). Проявление данного эффекта особенно заметно из сравнения кривых прохождения для каналов с $w = 100$ мкм из хрома и пермаллоя (кривые 3 на рис. 4, а и рис. 4, б) – на частоте максимума прохождения в структуре из Py ($f \approx 6.2$ ГГц) для структуры из Cr сигнал падает до уровня наводки (на ≈ 30 дБ). Увеличение неоднородности поля в канале из Py с уменьшением его ширины приводило к тому, что при $w = 50$ мкм данный эффект уже не проявлялся (кривая 4 на рис. 4, б).

Увеличение толщины декораций из пермаллоя до $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм кардинально меняет вид АЧХ прошедшего через каналы сигнала по сравнению с $d(\text{Py}) = 30$ нм (см. рис. 3, г и рис. 4, г). В низких полях для $w = 100$ и 200 мкм в центре зоны прохождения и на частотах вблизи f_0 образуются широкие провалы (см. рис. 3, г), разделяя зону прохождения на две части. Амплитуда прошедшего сигнала с уменьшением ширины канала ослабевает в обеих этих частях зоны прохождения. Это указывает на то, что две части АЧХ обусловлены прохождением ПМСВ по области канала, поскольку потери под металлом настолько велики, что отклик от ПМСВ под $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм должен наблюдаться в узкой полосе вблизи f_0 (см. рис. 2, а).

При ширине канала $w = 50$ мкм для $d(\text{Py}) = 1.5$ мкм при низких полях прохождение по всей зоне прохождения падало до уровня наводки, за исключением узкой длинноволновой области (см. рис. 3, г), что отражает высокие потери под металлом (см. рис. 2, ж).

Микромагнитное моделирование (см. рис. 5) показывает, что статическое внутреннее поле под декорациями как с $d(\text{Py}) = 30$ нм, так и $d(\text{Py}) = 1500$ нм понижается относительно приложен-

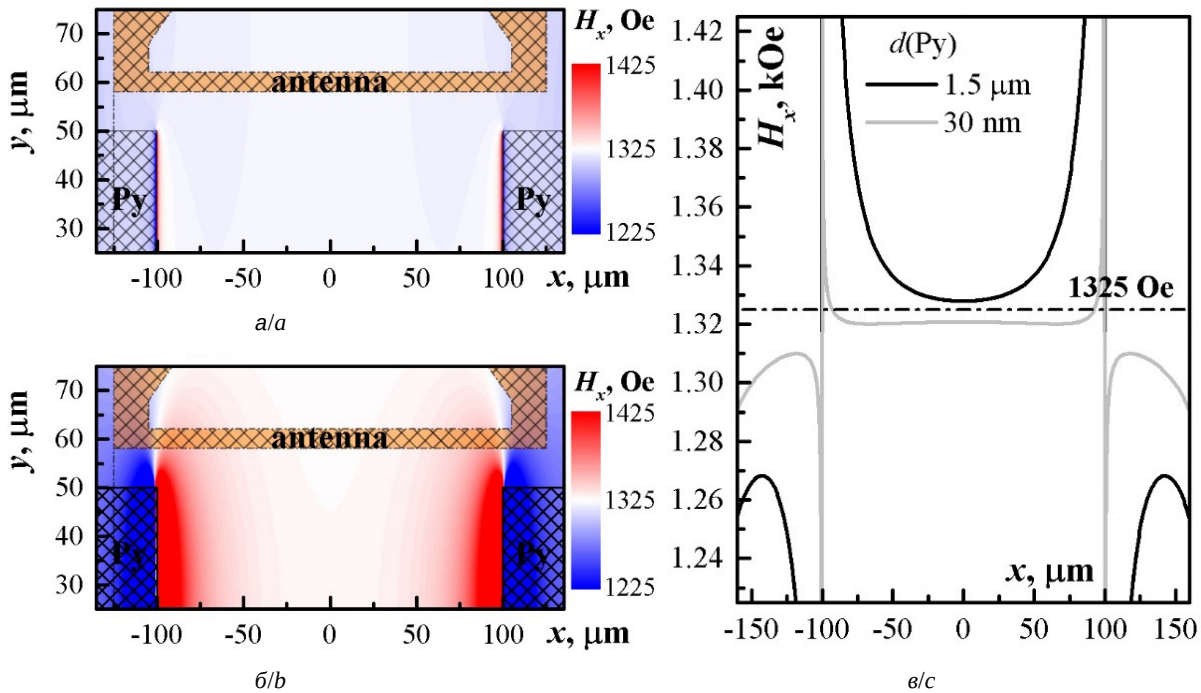


Рис. 5. Распределение внутреннего поля в приповерхностном слое ЖИГ, на котором расположен канал из пермаллоя толщиной: а – 30 нм; б – 1.5 мкм; в – сечение распределений при фиксированном $y = 25 \mu\text{м}$ и $z = 6.5 \mu\text{м}$. Штриховкой показаны области, на которых располагаются участки пермаллоя и антенна. Внешнее поле, приложенное вдоль оси x , составляет 1325 Э (цвет онлайн)

Fig. 5. Distribution of the internal field in the surface layer of YIG covered with the channel from permalloy with the thickness: $a - 30 \text{ nm}$; $b - 1.5 \mu\text{m}$; $c -$ cross-section of the distributions at the fixed $y = 25 \mu\text{m}$ and $z = 6.5 \mu\text{m}$. Hatching shows regions where areas from permalloy and antenna are located. The external field applied along axis x is 1325 Oe (color online)

ного поля, и вблизи перехода между покрытым и непокрытым пермаллоем участками ЖИГ формируется область неоднородности поля. Если для $d(\text{Py}) = 30 \text{ нм}$ область неоднородности простирается на толщину до $d(\text{YIG}) = 4 \text{ мкм}$, а по координате x – на расстояние около 5 мкм, то для случая $d(\text{Py}) = 1500 \text{ нм}$ область резко неоднородного поля простирается на всю толщину плёнки ЖИГ, а по координате x – на расстояния около 25–30 мкм. Кроме того, область неоднородного поля от декораций из пермаллоя с $d(\text{Py}) = 1500 \text{ нм}$ простирается до расположения антенн. Следовательно, возбуждение сигнала может происходить по данным неоднородным областям с повышенным полем в канале и пониженным полем под декорациями. На повышенные значения поля в области канала относительно приложенного поля указывает то, что коротковолновая часть зоны прохождения простирается на частоты $f > f_s$ (см. рис. 3, з).

С ростом поля прохождения ПМСВ в каналах из $d(\text{Py}) = 1.5 \text{ мкм}$ значительно отличалось от наводки лишь для канала $w = 200 \text{ мкм}$ (см. рис. 4, з). При этом АЧХ становилась сильно изрезанной за счёт интерференции с наводкой,

прохождение в коротковолновой части сильно ухудшалось.

Заключение

Таким образом, в работе было исследовано прохождение ПМСВ, дисперсионные характеристики и вносимые потери в плёнках ЖИГ, покрытых магнитными и немагнитными металлами, экспериментально изучено прохождение ПМСВ в плёнке ЖИГ с каналами из нанесённых на её поверхность металлизированных областей. Проведено сравнение случаев «тонкой» и «толстой» металлизации, когда толщина металла, соответственно, много меньше и сравнима с глубиной скин-слоя. Показано наличие оптимальной ширины канала в $w = 200 \text{ мкм}$ по отношению к апертуре антенн, которая способствует каналированию сигнала с возможностью проявления эффекта «просветления» в АЧХ прошедшего сигнала. Для этого в случае немагнитных декораций необходимо использовать толщину плёнок металлов, при которой происходит переход на «металлическую» ветку дисперсии ПМСВ (для исследуемых структур – $d(\text{Cr}) = 1.5 \text{ мкм}$), в то время как для декораций из ферромагнитных



металлов оказывается достаточным толщины декораций в $d(\text{Py}) = 30$ нм. Полученные результаты показывают возможность использования каналов из металлических декораций для формирования направленных пучков спиновых волн.

Список литературы

1. Хитун А. Г., Кожанов А. Е. Приборы магнотонной логики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 216–241. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241>
2. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics // J. Phys. D. Appl. Phys. 2010. Vol. 43, № 26. Article number 264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
3. Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B. YIG magnonics // J. Phys. D. Appl. Phys. 2010. Vol. 43, № 26. Article number 264002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264002>
4. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotozana S., Naeemi A., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V. E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V. V., Poimanov V. D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Münzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R. E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T., Bauer G. E. W., Back C., Uhrig G. S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap // J. Phys.: Cond. Matt. 2021. Vol. 33, № 41. Article number 413001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/abec1a>
5. Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Magnonic holographic memory // IEEE Trans. Magn. 2015. Vol. 51, iss. 4. Article number 4002905. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2362723>
6. Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Kozhevnikov A. V., Dudko G. M., Filimonov Y. A., Khitun A. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects // J. Magn. Magn. Mater. 2022. Vol. 545. Article number 168754. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168754>
7. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevsky Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Field-Controlled Phase-Rectified Magnonic Multiplexer // IEEE Trans. Magn. IEEE. 2015. Vol. 51, iss. 11. Article number 3401904. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2447010>
8. Papp B., Porod W., Csurgay B. I., Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Article number 9245. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09485-7>
9. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Article number 8771. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06531-2>
10. Дудко Г. М., Кожневников А. В., Сахаров В. К., Стальмахов А. В., Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Расчет фокусирующих преобразователей спиновых волн методом микромагнитного моделирования // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 92–102. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102>
11. Beginin E. N., Sadovnikov A. V., Sharaevskaya A. Y., Stognij A. I., Nikitov S. A. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112, iss. 12. Article number 122404. <https://doi.org/10.1063/1.5023138>
12. Sakharov V. K., Beginin E. N., Khivintsev Y. V., Sadovnikov A. V., Stognij A. I., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics // Appl. Phys. Lett. 2020. Vol. 117, iss. 2. Article number 022403. <https://doi.org/10.1063/5.0013150>
13. Stancil D. D., Morgenthaler F. R. Guiding magnetostatic surface waves with nonuniform in-plane fields // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54, iss. 3. P. 1613–1618. <https://doi.org/10.1063/1.332146>
14. Анненков А. Ю., Герус С. В., Ковалев С. И. Объемные и поверхностно-объемные магнитостатические волны в волноводах, создаваемых ступенчатым полем подмагничивания // ЖТФ. 2004. Т. 49, вып. 2. С. 98–104.
15. Vugalter G. A., Korovin A. G. Total internal reflection of backward volume magnetostatic waves and its application for waveguides in ferrite films // J. Phys. D. Appl. Phys. 1998. Vol. 31, № 11. P. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
16. Хивинцев Ю. В., Дудко Г. М., Сахаров В. К., Никулин Ю. В., Филимонов Ю. А. Распространение спиновых волн в микроструктурах на основе пленок железиттриевого граната, декорированных ферромагнитным металлом // ФТТ. 2019. Т. 61, вып. 9. С. 1664–1671. <https://doi.org/10.21883/FIT.2019.09.48108.15N>
17. Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Джумалиев А. С., Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Филимонов Ю. А. Распространение спиновых волн в каналах, полученных декорированием поверхности пленок железо-иттриевого граната тонкими металлическими областями // ФТТ. 2023. Т. 65, вып. 7. С. 1186–1193. <https://doi.org/10.21883/FIT.2023.07.55843.20H>
18. Kanazawa N., Goto T., Hoong J. W., Buyandalai A., Takagi H., Inoue M. Metal thickness dependence on spin wave propagation in magnonic crystal using yttrium iron garnet // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 117. Article number 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
19. Seshadri S. R. Surface Magnetostatic Modes of a Ferrite Slab // Proc. IEEE. 1970. Vol. 58, iss. 3. P. 506–507. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7680>
20. Camley R. E., Maradudin A. A. Magnetostatic interface waves in ferromagnets // Solid State Commun. 1982. Vol. 41, iss. 8. P. 585–588. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(82\)90946-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(82)90946-2)



21. Зубков В. И., Епанечников В. А., Щеглов В. И. Дисперсионные характеристики поверхностных магнитостатических волн в двуслойной ферромагнитной пленке // РЭ. 2007. Т. 52, № 2. С. 192–201.
22. Зубков В. И., Локк Э. Г., Нам Б. П., Хе А. С., Щеглов В. И. Дисперсия поверхностных магнитостатических волн в двуслойных ферритовых пленках // ЖТФ. 1989. Т. 59, вып. 12. С. 115–117.
23. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // J. Phys. Chem. Solids. 1961. Vol. 19, iss. 3–4. P. 308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
24. Khivintsev Y. V., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. Article number 052407. <https://doi.org/10.1063/1.4907626>
25. Donahue M. J., Porter D. G. OOMMF user's guide, version 1.0. Gaithersburg, MD : NIST, 1999. 83 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6376>
26. Филимонов Ю. А., Хивинцев Ю. В. Взаимодействие поверхностной магнитостатической и объемных упругих волн в металлизированной структуре ферромагнетик-диэлектрик // РЭ. 2002. Т. 47, № 8. С. 1002–1007.
27. Mruczkiewicz M., Krawczyk M. Nonreciprocal dispersion of spin waves in ferromagnetic thin films covered with a finite-conductivity metal // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. Article number 113909. <https://doi.org/10.1063/1.4868905>
28. Kolodin P. A., Gromova Y. V., Kostylev M. P. Effect of Surface Spin Pinning on the Spin-Wave Propagation in Yttrium Iron Garnet Films // IEEE Trans. Magn. 1997. Vol. 33, iss. 6. P. 4465–4468. <https://doi.org/10.1109/20.649883>
- Bauer G. E. W., Back C., Uhrig G. S., Dobrovolskiy O. V., Budinska B., Qin H., van Dijken S., Chumak A. V., Khitun A., Nikonov D. E., Young I. A., Zingsem B. W., Winklhofer M. The 2021 magnonics roadmap. *J. Phys.: Cond. Matt.*, 2021, vol. 33, no. 41, article no. 413001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/abec1a>
5. Gertz F., Kozhevnikov A., Filimonov Y., Khitun A. Magnonic holographic memory. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, iss. 4, article no. 4002905. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2362723>
6. Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Kozhevnikov A. V., Dudko G. M., Filimonov Y. A., Khitun A. Spin waves in YIG based magnonic networks: Design and technological aspects. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, vol. 545, article no. 168754. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168754>
7. Davies C. S., Sadovnikov A. V., Grishin S. V., Sharaevsky Y. P., Nikitov S. A., Kruglyak V. V. Field-Controlled Phase-Rectified Magnonic Multiplexer. *IEEE Trans. Magn.*, 2015, vol. 51, iss. 11, article no. 3401904. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2447010>
8. Papp B., Porod W., Csurgay B. I., Csaba G. Nanoscale spectrum analyzer based on spin-wave interference. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, article no. 9245. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09485-7>
9. Gieniusz R., Gruszecki P., Krawczyk M., Guzowska U., Stognij A., Maziewski A. The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, article no. 8771. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06531-2>
10. Dudko G. M., Kozhevnikov A. V., Saharov V. K., Stalmahov A. V., Filimonov Y. A., Khivintsev Y. V. Calculation of Focusing Spin Wave Transducers Using the Method of Micromagnetic Simulation. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 92–102 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2018-18-2-92-102>
11. Beginin E. N., Sadovnikov A. V., Sharaevskaya A. Y., Stognij A. I., Nikitov S. A. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, iss. 12, article no. 122404. <https://doi.org/10.1063/1.5023138>
12. Sakharov V. K., Beginin E. N., Khivintsev Y. V., Sadovnikov A. V., Stognij A. I., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, vol. 117, iss. 2, article no. 022403. <https://doi.org/10.1063/5.0013150>
13. Stancil D. D., Morgenthaler F. R. Guiding magnetostatic surface waves with nonuniform in-plane fields. *J. Appl. Phys.*, 1983, vol. 54, iss. 3, pp. 1613–1618. <https://doi.org/10.1063/1.332146>
14. Annenkov A. Y., Gerus S. V., Kovalev S. I. Bulk and Surface-Bulk Magnetostatic Waves in Waveguides Produced by a Step Bias Field. *Tech. Phys.*, 2004, vol. 49, iss. 2, pp. 239–244. <https://doi.org/10.1134/1.1648962>
15. Vugalter G. A., Korovin A. G. Total internal reflection of backward volume magnetostatic waves and its application for waveguides in ferrite films. *J. Phys. D. Appl.*

References

1. Khitun A. G., Kozhanov A. E. Magnonic Logic Devices. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 216–241 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2017-17-4-216-241>
2. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 26, article no. 264001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264001>
3. Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B. YIG magnonics. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 2010, vol. 43, no. 26, article no. 264002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/26/264002>
4. Barman A., Gubbiotti G., Ladak S., Adeyeye A. O., Krawczyk M., Gräfe J., Adelman C., Cotozana S., Naeemi A., Vasyuchka V. I., Hillebrands B., Nikitov S. A., Yu H., Grundler D., Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Duquesne J.-Y., Marangolo M., Csaba G., Porod W., Demidov V. E., Urazhdin S., Demokritov S. O., Albisetti E., Petti D., Bertacco R., Schultheiss H., Kruglyak V. V., Poimanov V. D., Sahoo S., Sinha J., Yang H., Münzenberg M., Moriyama T., Mizukami S., Landeros P., Gallardo R. A., Carlotti G., Kim J.-V., Stamps R. L., Camley R. E., Rana B., Otani Y., Yu W., Yu T.,



- Phys.*, 1998, vol. 31, no. 11, pp. 1309–1319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/11/004>
16. Khivintsev Y. V., Dudko G. M., Sakharov V. K., Nikulin Y. V., Filimonov Y. A. Propagation of Spin Waves in Microstructures Based on Yttrium – Iron Garnet Films Decorated by a Ferromagnetic Metal. *Phys. Solid State*, 2019, vol. 61, iss. 9, pp. 1614–1621. <https://doi.org/10.1134/S1063783419090129>
 17. Sakharov V. K., Khivintsev Y. V., Dzhumaliev A. S., Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Filimonov Y. A. Propagation of spin waves in channels formed by decoration of the surfaces of yttrium-iron garnet films by thin metal areas. *Phys. Solid State*, 2023, vol. 65, iss. 7, pp. 1134–1140. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.07.56404.20H>
 18. Kanazawa N., Goto T., Hoong J. W., Buyandalai A., Takagi H., Inoue M. Metal thickness dependence on spin wave propagation in magnonic crystal using yttrium iron garnet. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 117, article no. 17E510. <https://doi.org/10.1063/1.4916815>
 19. Seshadri S. R. Surface Magnetostatic Modes of a Ferrite Slab. *Proc. IEEE*, 1970, vol. 58, iss. 3, pp. 506–507. <https://doi.org/10.1109/PROC.1970.7680>
 20. Camley R. E., Maradudin A. A. Magnetostatic interface waves in ferromagnets. *Solid State Commun.*, 1982, vol. 41, iss. 8, pp. 585–588. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(82\)90946-2](https://doi.org/10.1016/0038-1098(82)90946-2)
 21. Zubkov V. I., Epanchnikov V. A., Shcheglov V. I. Dispersion Characteristics of Magnetostatic Surface Waves in a Two-Layer Ferromagnetic Film. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2007, vol. 52, no. 2, pp. 179–188. <https://doi.org/10.1134/S1064226907020076>
 22. Zubkov V. I., Lokk E. G., Nam B. P., Khe A. S., Scheglov V. I. Dispersion of magnetostatic surface waves in two-layer ferrite films. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiz.*, 1989, vol. 59, iss. 12, pp. 115–117 (in Russian).
 23. Damon R. W., Eshbach J. R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, vol. 19, iss. 3–4, pp. 308–320. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5)
 24. Khivintsev Y. V., Filimonov Y. A., Nikitov S. A. Spin wave excitation in yttrium iron garnet films with micron-sized antennas. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, article no. 052407. <https://doi.org/10.1063/1.4907626>
 25. Donahue M. J., Porter D. G. *OOMMF user's guide, version 1.0*. Gaithersburg, MD, NIST. 1999. 83 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.6376>
 26. Filimonov Y. A., Khivintsev Y. V. Interaction between a Magnetostatic Surface Wave and Bulk Elastic Waves in a Metallized Ferromagnet–Dielectric Structure. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2002, vol. 47, no. 8, pp. 910–915.
 27. Mruczkiewicz M., Krawczyk M. Nonreciprocal dispersion of spin waves in ferromagnetic thin films covered with a finite-conductivity metal. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, article no. 113909. <https://doi.org/10.1063/1.4868905>
 28. Kolodin P. A., Gromova Y. V., Kostylev M. P. Effect of Surface Spin Pinning on the Spin-Wave Propagation in Yttrium Iron Garnet Films. *IEEE Trans. Magn.*, 1997, vol. 33, iss. 6, pp. 4465–4468. <https://doi.org/10.1109/20.649883>

Поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 09.12.2023; принята к публикации 20.12.2023
The article was submitted 01.11.2023; approved after reviewing 09.12.2023; accepted for publication 20.12.2023



PERSONALIA

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 88–97
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 88–97
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-88-97>, EDN: QYKYMT

Научная статья
УДК 53(091):53(092)

Валерий Викторович Тучин (к 80-летию со дня рождения)

Э. А. Генина^{1,2✉}, Ю. П. Синичкин¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, Проспект Ленина, д. 36

Генина Элина Алексеевна, доктор физико-математических наук, ¹профессор кафедры оптики и биофотоники; ²ведущий научный сотрудник Лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, eagenina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6359-2969>

Синичкин Юрий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники, yusin49@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7554-5038>

Аннотация. Приводится краткая биография заведующего кафедрой оптики и биофотоники Саратовского университета, доктора физико-математических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Валерия Викторовича Тучина, обсуждается его вклад в лазерную физику и биофотонику.

Ключевые слова: лазерная физика, спектроскопия, оптика, биофотоника, оптическое просветление биологических тканей, научная и образовательная деятельность

Благодарности: Авторы благодарят Н. А. Тучину за предоставленные фотографии из домашнего архива.

Для цитирования: Генина Э. А., Синичкин Ю. П. Валерий Викторович Тучин (к 80-летию со дня рождения) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 88–97. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-88-97>, EDN: QYKYMT

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Valery Viktorovich Tuchin (On the 80th anniversary)

E. A. Genina^{1,2✉}, Yu. P. Sinichkin¹

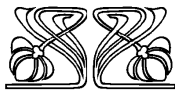
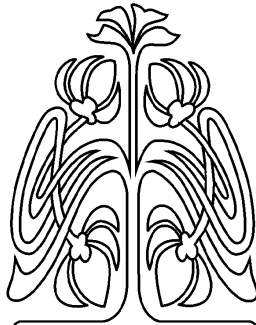
¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia

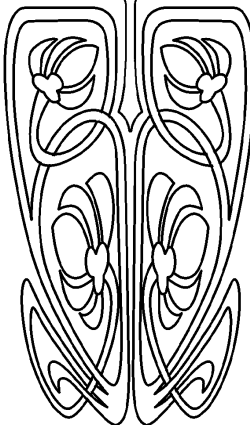
Elina A. Genina, eagenina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6359-2969>

Yury P. Sinichkin, yusin49@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7554-5038>

Abstract. Background and Objectives: A brief biography of Valery Tuchin, head of Optics and Biophotonics Department of Saratov State University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences is presented; his contribution to laser physics and biophotonics is discussed. **Summary:** Scientific activity of Valery Tuchin in the 60s was associated with laser physics. His interests included fluctuations in laser radiation, dynamic processes in gas-discharge lasers, and modulation characteristics of lasers. In the mid-80s, Professor Valery Tuchin began to create his own scientific school in the field of tissue optics, which eventually developed into the interdisciplinary science of biomedical photonics, and pioneered “tissue optical clearing” as a new direction. Over the years, the results achieved have received international recognition. Tuchin’s students continue to move along a given vector, developing his ideas and achieving great success and recognition not only in Russia but also abroad. He generously shares ideas with colleagues, connecting Saratov State



ПРИЛОЖЕНИЯ





University with scientific groups around the world. His authority and charisma, as well as his tremendous energy and efficiency, make it possible to implement great international projects, conferences and symposiums. Valery Tuchin is the organizer and inspirer of the Saratov Fall Meeting, which is widely known in the scientific world. Thanks to Valery Tuchin, students and young scientists from Saratov State University were among the first in Russia to have the opportunity to listen to lectures of heads of leading scientific groups, present and discuss their results, establish scientific and friendly connections with peers from other cities of the world. From 1989 to the present, Valery Tuchin has been the permanent head of the Optics and Biophotonics Department at Saratov State University. **Conclusion:** Professor Valery Tuchin is a unique example of both an outstanding scientist and a talented teacher and organizer of the scientific process. He have created a scientific school known all over the world. His fruitful scientific and educational activities have marked by the awarding of medals, orders, honorary titles and prizes from the State and various scientific communities, as SPIE, OCA, Laser Association of the Russian Federation and others.

Keywords: laser physics, spectroscopy, optics, biophotonics, tissue optical clearing, scientific and educational activity

Acknowledgments: The authors thank Natalia A. Tuchina for providing photographs from her home archive.

For citation: Genina E. A., Sinichkin Yu. P. Valery Viktorovich Tuchin (On the 80th anniversary). *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 88–97 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-88-97>, EDN: QYKYMT

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

4 февраля 2024 года исполнилось 80 лет Валерию Викторовичу Тучину – доктору физико-математических наук, профессору, заведующему кафедрой оптики и биофотоники физического института Саратовского национального исследовательского государственного университета, члену-корреспонденту РАН, заслуженному деятелю науки РФ, автору фундаментальных научных трудов мирового уровня в области физики лазеров и биофотоники, лауреату многочисленных премий в области науки, блестящему учёному, выдающемуся педагогу и просто замечательному человеку.

Валерий Викторович Тучин, один из ведущих мировых специалистов в области биофотоники, родился в Саратове. В 1966 г. он окончил кафедру радиофизики и электроники физического факультета Саратовского государственного университета.

В 60-х годах прошлого столетия в развитии мировой науки произошел взрыв, связанный с созданием оптического квантового генератора света, который не обошел стороной кафедру оптики Саратовского университета. В эти годы ко многим работам сотрудников кафедры правомочно добавлялось слово «впервые» (первая монография по лазерам М. Л. Каца, М. А. Ковнера, Н. К. Сидорова; первый, по крайней мере, в Саратовской области, твердотельный лазер, изготовленный сотрудниками кафедры оптики Г. И. Асеевым, М. А. Старшовым и Ю. П. Турбиным; первая кандидатская диссертация по физике лазеров А. Г. Величко), успешно функционировала научная группа Проблемной лаборатории квантовой электроники (впоследствии лаборатории 41 НИИМФ СГУ), которой руководил В. А. Седелников.

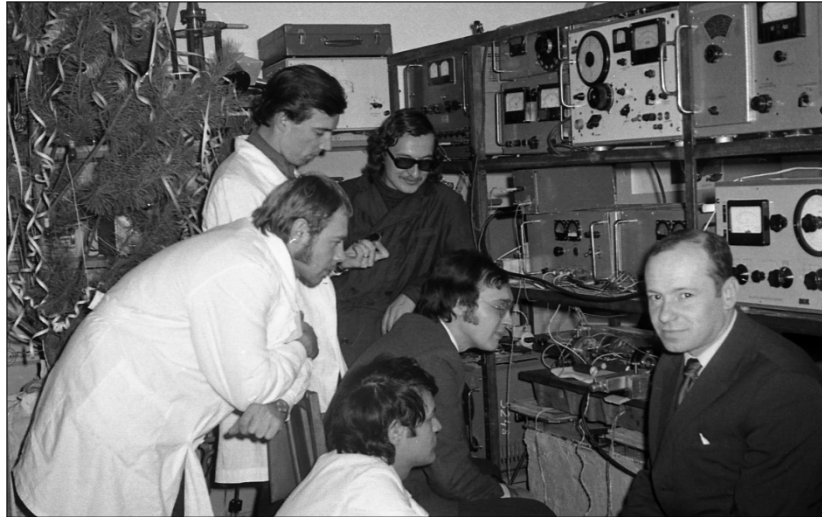
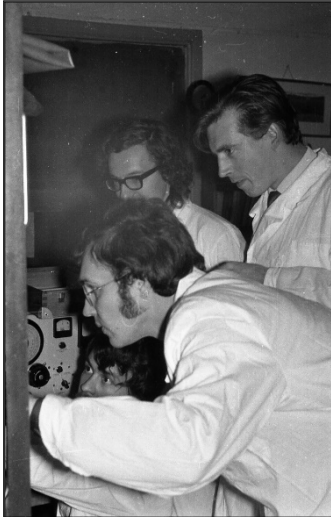
Лазерная тематика стала основной в научных исследованиях аспиранта В. В. Тучина. Его

интересы как выпускника кафедры радиофизики касались флуктуаций в излучении лазера, динамических процессов в газоразрядных лазерах, модуляционных характеристик лазеров. По данной тематике Валерий Викторович защитил кандидатскую (1974) и докторскую (1982) диссертации, опубликовал монографии «Флуктуации в газовых лазерах» (1981) [1] и «Динамические процессы в газоразрядных лазерах» (1990) [2].

В эти же годы отчетливо проявились организаторские способности В. В. Тучина. Вокруг него образовался коллектив молодых ученых, каждый из которых занимался определенными типами газоразрядных лазеров: Г. Г. Акчурина, В. И. Четвериков и Э. М. Рабинович – комплексными исследованиями гелий-неонового лазера, включая расчеты коэффициента усиления и линзовые эффекты, Л. А. Мельников – кольцевыми лазерами, областью интересов Ю. П. Синичкина был ионный аргоновый лазер, Д. Н. Гаврилова – лазеры на молекулах оксида и двуокси углерода, А. Р. Кристаллова – процессы столкновений частиц в плазме газового разряда. Впоследствии они стали ведущими специалистами в области лазерной физики, нелинейной оптики и спектроскопии.

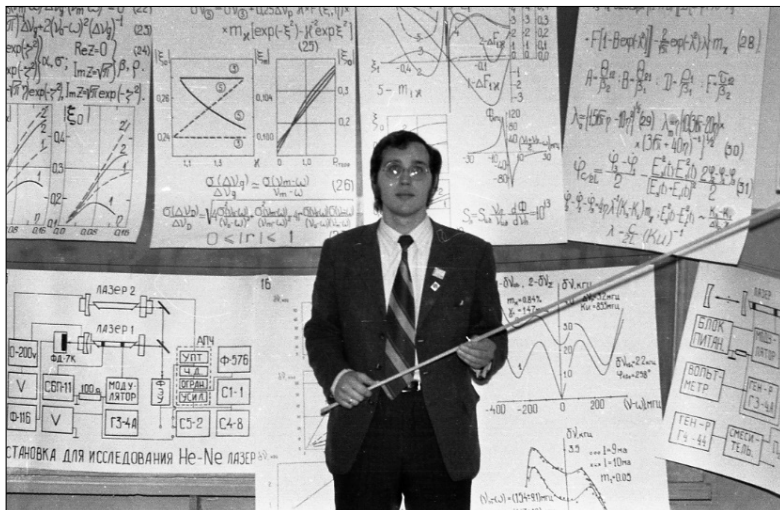
Из воспоминаний профессора Ю. П. Синичкина:

«Одним из экспериментов было временное определение флуктуаций лазерного пучка в пространстве. Эксперимент проводился с гелий-неоновым лазером, который располагался на третьем этаже III корпуса (в комнате 56). Пятно излучения лазера фиксировалось на Лысой горе рядом с телевизором, куда в ночное время были «командированы» сотрудники лаборатории. Пятно излучения лазера размером менее 1 метра было успешно детектировано и в течение нескольких часов фиксировались флуктуации центра пятна.»

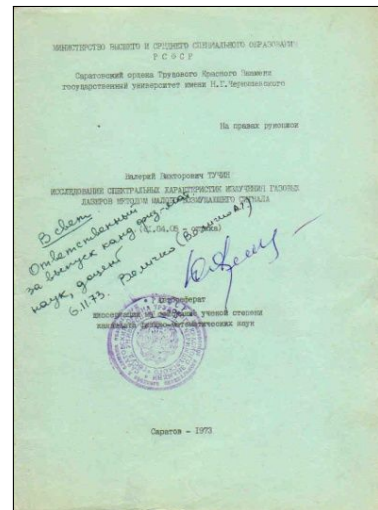


Аспирант В. В. Тучин в научной группе Проблемной лаборатории квантовой электроники (конец 60-х – начало 70-х годов)

Ph.D. student Valery V. Tuchin in the scientific group of the Problem Laboratory of Quantum Electronics (late 60s – early 70s)



Защита кандидатской диссертации (1973)
The defense of the Ph.D. thesis (1973)



Обложка автореферата кандидатской диссертации
Cover of the abstract of the Ph.D.

Помимо научных исследований молодые сотрудники лаборатории во главе с В. В. Тучиным и В. А. Дубровским эффективно выплескивали свою энергию в спортивных батаях в вечернее время, среди которых выделялись баскетбольные сражения на площадке около 5 корпуса, соревнование заездов на велосипеде на время вокруг корпуса химического факультета».

В середине 1980-х гг. Валерий Викторович начал создание своей научной школы в области оптики биотканей, выросшей со временем в междисциплинарную науку – биомедицинскую фотонику. Исследования в этой области начинались совместно с Л. П. Шубочкиным, под руко-

водством которого в Клинике глазных болезней СГМУ им. Разумовского был создан один из первых в России лазерный центр. Основное направление исследований – лазерная микрохирургия глаза с различными патологиями. Были разработаны оптические модели тканей глаза, освоены методики лазерной диагностики в офтальмологии (Л. П. Шубочкин, И. Л. Максимова, В. В. Тучин). В 1989 г. вышла в свет первая коллективная монография [3].

Первая публикация, посвящённая увеличению оптической прозрачности склеры глаза и созданию модели управления рассеивающими характеристиками соединительной ткани под дей-



ствием гиперосмотических иммерсионных жидкостей, появилась в 1987 г. и положила начало новому направлению мировой науки, которое в настоящее время известно как оптическое просветление биологических тканей [4].

В последующие годы совместные научные исследования стали проводиться с другими подразделениями медицинского университета – Клиникой кожных и венерологических заболеваний (С. Р. Утц) [5], клиникой болезней уха, горла, носа (О. В. Мареев) [6], кафедрой патологической физиологии (Г. Е. Бриль, Е. И. Захарова (Галанжа)) [7] и т. д. По инициативе В. В. Тучина сотрудники кафедры оптики включились в новые направления, такие как оптика биотканей и крови и управление поглощающими и рассеивающими характеристиками биотканей (Ю. П. Синичкин, В. И. Кочубей, Д. А. Зимняков, С. С. Ульянов, А. Н. Башкатов, А. Б. Правдин, С. П. Чернова, Э. А. Генина, Г. В. Симоненко и др.).

Из воспоминаний профессора Ю. П. Синичкина:

*«В 1994 году в журнале «Оптика и спектроскопия» (Т. 76, № 5) были опубликованы материалы по итогам прошедшего в 1993 году «Волга-Лазер-Тур'93» (27 июня – 4 июля 1993), когда на теплоходе «Александр Суворов» Москва – Нижний Новгород состоялась международная конференция, на которой в одной из секций были представлены доклады по биомедицинской оптике. Публикация статей по этим докладам оказала существенное влияние на тематику журнала: если раньше редакция скептически относилась к биомедицинской тематике (например, такие термины как *in vivo*, эритема и т. п. не воспринимались редакцией), то большой интерес читателей журнала к вышедшему номеру дал толчок к тому, что в будущем в тематике журнала появились статьи по биомедицинской оптике».*

Вклад В. В. Тучина в развитие данного тематического направления был оценён в 2011 г.: Международная академическая издательская компания «Наука» наградила коллектив авторов кафедры оптики и биофотоники (под руководством В. В. Тучина) за цикл работ по биомедицинской оптике в журнале «Оптика и спектроскопия».

За эти годы достигнутые результаты получили и международное признание. Так, в 2005 г. была опубликована статья [8], которая вошла в краткий список 12 наиболее важных статей, опубликованных в серии «Journal of Physics» британского издательства Института физики (IOP)

за последние 50 лет (1285 цитирований по версии РИНЦ на 2023 г.). Наиболее цитируемой статьёй журнала «Journal of Innovative Optical Health Sciences» была признана статья [9] (550 цитирований). В 2016 г. статья [10] вошла в список лучших статей журнала «Nano Research» (140 цитирований).

Ученики Валерия Викторовича продолжают двигаться по заданному вектору, развивая его идеи и добиваясь больших успехов и признания не только в нашей стране, но и за рубежом. Среди них профессор Хьюстонского университета Кирилл Ларин, профессор Массачусетского университета Лоуэлл (США) Анна Ярославская, профессор университетов Астона (Великобритания) и Оулу (Финляндия) Игорь Меглинский, профессор Политехнического института Порту (Португалия) Луис Оливейра, профессор Хуачжунского университета науки и технологии (Китай) Дан Жу и многие другие.

В Саратовском университете активно развивается направление, связанное с управлением оптическими параметрами биотканей для повышения эффективности диагностики и терапии различных заболеваний (Э. А. Генина, К. В. Березин, Д. К. Тучина, Е. Н. Лазарева), фотодинамическая и фототермическая терапия (Э. А. Генина, И. Ю. Янина, В. Д. Генин), лазерная спекл-контрастная визуализация (П. А. Тимошина) и др.

Валерий Викторович – человек удивительной научной интуиции. Он щедро делится идеями с коллегами, связав наш университет с научными группами по всему миру. Его авторитет и харизма, а также потрясающая энергия и работоспособность позволяют реализовать крупные международные проекты, конференции и симпозиумы, как в России, так и за рубежом. С 1990 по 2023 г. Валерий Викторович многократно приглашался профессором в ведущие университеты Европы, Азии, Северной и Южной Америк.

Уже почти 30 лет ежегодно под эгидой «Saratov Fall Meeting» (SFM) в Саратовском университете проходят международные мероприятия, в которых принимают участие ведущие и молодые учёные из разных стран. Организатором и вдохновителем этого широко известного в научном мире события является В. В. Тучин. Начинаясь SFM с одного междисциплинарного семинара и осенней школы для молодых учёных, студентов и аспирантов «Методы светорассеяния в механике, биомедицине и материаловедении», однако уже тогда, может быть, впервые в мире, была организована интернет-



Встречи В. В. Тучина с бывшими учениками (в разные годы): профессором Дан Жу (на фотографии крайняя справа, сидит) и студентами Хуажунского университета науки и технологии (сверху слева); профессором Политехнического института Порту Луисом Оливейра (сверху справа); выпускниками Саратовского университета, профессорами университетов Астона и Оулу Игорем Меглинским и Массачусетского университета Лоуэлл Анной Ярославской (на фотографии крайняя справа) (снизу слева) и профессором Хьюстонского университета Кириллом Лариным (снизу справа)

Valery V. Tuchin's meetings with his former students: Professor Dan Zhu (in the photo, far right, sitting) and students of Huazhong University of Science and Technology (top left), Professor of Polytechnic Institute of Porto Luis Oliveira (top right), graduates of Saratov State University, Professors of Aston University and University of Oulu Igor Meglinski and University of Massachusetts Lowell Anna Yaroslavsky (in the photo, far right) (bottom left), and Professor of Houston University Kirill Larin (bottom right)

сессия, на которой представлялись записанные лекции именитых учёных, а слушатели в реальном времени могли задать вопросы докладчикам с помощью оригинальной платформы, разработанной сотрудниками кафедры оптики. С тех пор в рамках SFM проводилось более 20 ежегодных всероссийских и международных конференций, читались краткие курсы лекций, научно-популярные лекции для школьников, организовывались двухсторонние российско-китайские, российско-

финские, российско-германские семинары и многосторонние семинары стран BRICS. Каждый год география и количество участников растут благодаря авторитету председателя, который привлекает к участию действительно выдающихся и именитых учёных. Среди пленарных лекторов, выступавших на SFM в разные годы, были нобелевский лауреат Аарон Чехановер, член Нобелевского комитета по физике Шведской королевской академии наук Суне Сванберг, Бриттон



В. В. Тучин выступает с приветственным словом к участникам Saratov Fall Meeting-2015

Valery V. Tuchin gives a welcoming speech to the Saratov Fall Meeting-2015 participants



Слушатели публичной лекции для школьников, студентов и молодых учёных в Большой физической аудитории (2017)

Listeners of a public lecture for schoolchildren, students and young scientists in the Great Physical Auditorium (2017)



Участники Saratov Fall Meeting у здания 10-го корпуса Саратовского университета (2017)
Saratov Fall Meeting participants at the 10th Building of Saratov State University (2017)



На закрытии Saratov Fall Meeting на даче у председателя, где традиционно вручаются награды студентам и аспирантам за лучший стендовый доклад (2016)

Traditional presenting awards to students and graduate students for the best poster presentation and the closing of Saratov Fall Meeting at the chairman's dacha (2016)



Чанс, Стивен Жак, Джеймс Фуджимото, Дэвид Боас, Барри Мастерс, Лихонг Ванг, Александр Ораевский, Александр Красновский, Юрий Романовский и многие другие. Благодаря Валерию Викторовичу наша молодёжь одна из первых в России имела возможность послушать лекции и пообщаться с представителями и руководителями ведущих научных групп, представить и обсудить свои результаты, наладить научные и дружеские связи с ровесниками из других городов мира.

Помимо SFM, Валерий Викторович является сопредседателем известных международных конференций, проводимых в рамках Photonics West в США, International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine (PIBM) в Китае и SPIE Photonics Europe во Франции.

Плодотворная научная деятельность В. В. Тучина отмечена присуждением ему высоких наград: медали «За Трудовое Отличие», орденов «Трудового Красного Знамени» и «Дружбы», званий заслуженного деятеля науки РФ, «Почетный профессор Саратовского университета» (2014), медалей Д. С. Рождественского (2018) и С. И. Ва-

вилова (2022) Российского оптического общества им. Д. С. Рождественского, медали имени Александра Михайловича Прохорова за разработку спектральных методов исследования тканей для решения задач медицинской диагностики и дозиметрии в лазерной терапии и хирургии Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова (2021). В 2023 г. Валерий Викторович стал лауреатом общенациональной премии «Профессор года» в номинации «Физико-математические науки».

В. В. Тучин является почетным членом международного общества по оптической технике (SPIE Fellow, 2004) и международного общества по оптике (OSA Fellow, 2016), а также почетным профессором многих университетов, экспертом научных фондов и исследовательских программ, членом международных советов и комитетов.

Одна из важнейших сфер деятельности Валерия Викторовича – образовательная. Начиная с 1989 г. в ведущих российских и международных издательствах регулярно выходят монографии и книги под авторством и редакцией В. В. Тучина, посвященные актуальным проблемам биофотоники. Они являются великолепным справочным



Подборка книг, посвящённых актуальным проблемам биофотоники, выпущенных под авторством или редакцией В. В. Тучина

A selection of books published under the authorship or editorship of Valery V. Tuchin, related to current problems of biophotonics



материалом не только для студентов, но и для учёных, поскольку в качестве соавторов глав выступают представители самых передовых научных групп в этой области.

Профессор В. В. Тучин является автором и соавтором более 1800 научных работ, цитирование которых составляет около 40000 (индексы Хирша WoS, 56, Scopus, 63 и РИНЦ, 66).

За выдающийся вклад в мировую науку и образование В. В. Тучин награжден премиями

международных обществ OSA и SPIE (2007, 2015, 2019); Chime Bell Prize провинции Хубэй, Китай (2014) в знак признательности за положительный вклад в экономическое и социальное развитие провинции Хубэй; Nanqiang Life Science за серию лекций Сямынь университета, Китай (2016), дипломом Лазерной Ассоциации РФ за лучшую отечественную разработку в области лазерной аппаратуры и лазерно-оптических технологий в номинации «Учебные пособия, справочные и на-



Фотографии сотрудников кафедры оптики и биофотоники разных лет: около 2000 г. (сверху слева), в 2016 г. с молодыми учёными и аспирантами (сверху справа) и в 2022 г.

Photographs of the Optics and Biophotonics Department from different years: around 2000 (top left), in 2016 with young scientists and graduate students (top right), and in 2022



учно-популярные издания лазерной тематики» за книгу «Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях» (издана в Издательстве Саратовского университета (1998), переиздана: М. : Физматлит (2010, 2012)). В 2019 г. В. В. Тучин был избран членом-корреспондентом РАН по специальности «Медицинская физика».

Валерий Викторович возглавляет редакции международных журналов «Journal of Biomedical Photonics & Engineering», «The Open Biomedical Engineering Journal» и «Materials» по направлению Optics and Photonics, является заместителем главного редактора журнала «Известия Саратовского университета. Серия Физика», тематическим редактором / редактором-консультантом журнала «Journal of Biomedical Optics» и членом редакционного совета и редколлегии многих известных журналов, таких как «Journal of Innovative Optical Health Sciences», «Квантовая электроника», «Лазерная медицина», «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», «Оптика и спектроскопия», «Письма в журнал технической физики», «Журнал технической физики», «Journal of Biophotonics» и др.

По данным РИНЦ, В. В. Тучин входит в 100 самых цитируемых (1-е место) и продуктивных (1-е место) российских учёных по направлению «Биотехнология», а также по направлению «Биология» (9-е и 18-е места соответственно) и по направлению «Медицина и здравоохранение» (18-е и 28-е места соответственно).

С 1989 г. по настоящее время В. В. Тучин является бессменным заведующим кафедрой оптики и биофотоники. Под руководством Валерия Викторовича защитились 40 кандидатов и 12 докторов наук. Он является уникальным примером выдающегося учёного, талантливого педагога и организатора научного процесса. Он создал научную школу, известную во всём мире.

Пример Валерия Викторовича не позволяет расслабляться. Из года в год сотрудники кафедры демонстрируют высокие показатели научной активности. Коллеги и ученики рады воспользоваться случаем, чтобы пожелать Валерию Викторовичу крепкого здоровья, творческого вдохновения и новых больших успехов в его многогранной деятельности!

Список литературы

1. Тучин В. В. Флуктуации в газовых лазерах : в 2 ч. / под редакцией М. Л. Каца. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1981.
2. Тучин В. В. Динамические процессы в газоразрядных лазерах. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.

3. Приезжев А. В., Тучин В. В., Шубочкин Л. П. Лазерная диагностика в биологии и медицине. М. : Наука, 1989. 237 с.
4. Бакуткин В. В., Максимова И. Л., Сапрыкин П. И., Тучин В. В., Шубочкин Л. П. Рассеяние света склеральной оболочкой глаза человека // Журнал прикладной спектроскопии. 1987. № 1. С. 104–107.
5. Утц С. Р., Тучин В. В. Перспективы применения лазеров ультрафиолетового диапазона в дерматологии // Физическая медицина. 1992. Т. 2, № 3–4. С. 52.
6. Genina E. A., Bashkatov A. N., Chikina E. E., Knyazev A. B., Mareev O. V., Tuchin V. V. Methylene Blue Mediated Laser Therapy of Maxillary Sinusitis // Laser Physics. 2006. Vol. 16, № 7. P. 1128–1133. <https://doi.org/10.1134/S1054660X06070188>
7. Bednov A. A., Ul'yanov S. S., Tuchin V. V., Brill G. E., Zakharova E. I. Speckle diagnostics of shuttle-stream lymph and blood flows // Proceedings of SPIE / eds. Daniel L. Farkas, Robert C. Leif, Alexander V. Priezzhev, Toshimitsu Asakura, Bruce J. Tromberg, 1996. P. 416–422.
8. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Tuchin V. V. Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 2543–2555. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/15/004>
9. Bashkatov A. N., Genina E. A., Tuchin V. V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: A review // J. Innov. Opt. Health Sci. 2011. Vol. 4, № 1. P. 9–38. <https://doi.org/10.1142/S1793545811001319>
10. Terentyuk G., Panfilova E., Khanadeev V., Chumakov D., Genina E., Bashkatov A., Tuchin V., Bucharskaya A., Maslyakov G., Khlebtsov N., Khlebtsov B. Gold nanorods with a hematoporphyrin-loaded silica shell for dual-modality photodynamic and photothermal treatment of tumors *in vivo* // Nano Research. 2014. Vol. 7, № 3. P. 325–337. <https://doi.org/10.1007/s12274-013-0398-3>

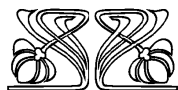
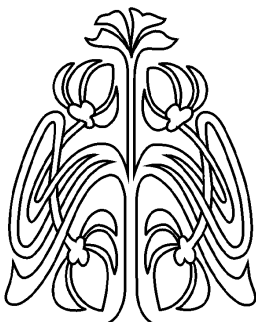
References

1. Tuchin V. V. *Flukuatsii v gasovykh laserakh: v 2 chastyakh* [Kats M. L., ed. Fluctuations in gas lasers]. Saratov, Saratov State University Publ., 1981. 164 p. (in Russian).
2. Tuchin V. V. *Dinamicheskie proessy v gasorazryadnykh laserakh* [Dynamic processes in gas-discharge lasers]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 248 p. (in Russian).
3. Priezzhev A. V., Tuchin V. V., Shubochkin L. P. *Lazernaya diagnostika v biologii i meditsine* [Laser diagnostics in biology and medicine]. Moscow, Nauka, 1989. 237 p. (in Russian).
4. Bakutkin V. V., Maksimova I. L., Saprykin P. I., Tuchin V. V., Shubochkin L. P. Light scattering by the human eye sclera. *J. Appl. Spectrosc.*, 1987, vol. 46, pp. 104–107.
5. Utz S. R., Tuchin V. V. Prospects for the use of ultraviolet lasers in dermatology. *Physical Medicine*, 1992, vol. 2, no. 3–4, pp. 52 (in Russian).

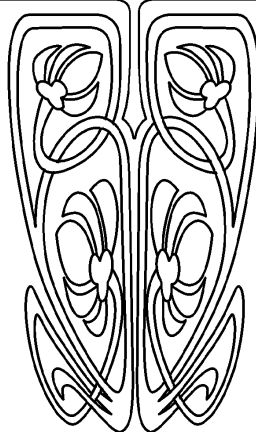


6. Genina E. A., Bashkatov A. N., Chikina E. E., Knyazev A. B., Mareev O. V., Tuchin V. V. Methylene Blue Mediated Laser Therapy of Maxillary Sinusitis. *Laser Physics*, 2006, vol. 16, no. 7, pp. 1128–1133. <https://doi.org/10.1134/S1054660X06070188>
7. Bednov A. A., Ul'yanov S. S., Tuchin V. V., Brill G. E., Zakharova E. I. Speckle diagnostics of shuttle-stream lymph and blood flows. Daniel L. Farkas, Robert C. Leif, Alexander V. Priezzhev, Toshimitsu Asakura, Bruce J. Tromberg, eds. *Proceedings of SPIE*, 1996, pp. 416–422.
8. Bashkatov A. N., Genina E. A., Kochubey V. I., Tuchin V. V. Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, vol. 38, pp. 2543–2555. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/15/004>
9. Bashkatov A. N., Genina E. A., Tuchin V. V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: A review. *J. Innov. Opt. Health Sci.*, 2011. vol. 4, no. 1, pp. 9–38. <https://doi.org/10.1142/S1793545811001319>
10. Terentyuk G., Panfilova E., Khanadeev V., Chumakov D., Genina E., Bashkatov A., Tuchin V., Bucharskaya A., Maslyakov G., Khlebtsov N., Khlebtsov B. Gold nanorods with a hematoporphyrin-loaded silica shell for dual-modality photodynamic and photothermal treatment of tumors *in vivo*. *Nano Research*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 325–337. <https://doi.org/10.1007/s12274-013-0398-3>

Поступила в редакцию 21.01.2024; одобрена после рецензирования 31.01.2024; принята к публикации 07.02.2024
The article was submitted 21.01.2024; approved after reviewing 31.01.2024; accepted for publication 07.02.2024



ПОДПИСКА



Подписка на печатную версию

Подписной индекс издания 36015
Оформить подписку на печатную версию
можно в Интернет-каталоге
ГК «Урал-Пресс» (ural-press.ru)
Журнал выходит 4 раза в год
Цена свободная

Электронная версия журнала находится
в открытом доступе (fizika.sgu.ru)

Адрес Издательства

Саратовского университета (редакции):

410012, Саратов, Астраханская, 83

Тел.: +7(845-2) 51-29-94, 51-45-49, 52-26-89

Факс: +7(845-2) 27-85-29

E-mail: publ@sgu.ru, izdat@sgu.ru

Адрес редколлегии серии:

410012, Саратов, Астраханская, 83,

СГУ имени Н. Г. Чернышевского,
физический факультет

Тел./факс: +7 (8452) 52-27-05

E-mail: fizik@sgu.ru

Website: <https://fizika.sgu.ru>



ISSN 1817-3020 (Print). ISSN 2542-193X (Online)
Известия Саратовского университета. Новая серия.
Серия: Физика. 2024. Том 24, выпуск 1

ИЗВЕСТИЯ САРАТОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Новая серия

- Серия: Акмеология образования. Психология развития
- Серия: История. Международные отношения
- Серия: Математика. Механика. Информатика
- Серия: Науки о Земле
- Серия: Социология. Политология
- Серия: Физика**
- Серия: Филология. Журналистика
- Серия: Философия. Психология. Педагогика
- Серия: Химия. Биология. Экология
- Серия: Экономика. Управление. Право

