



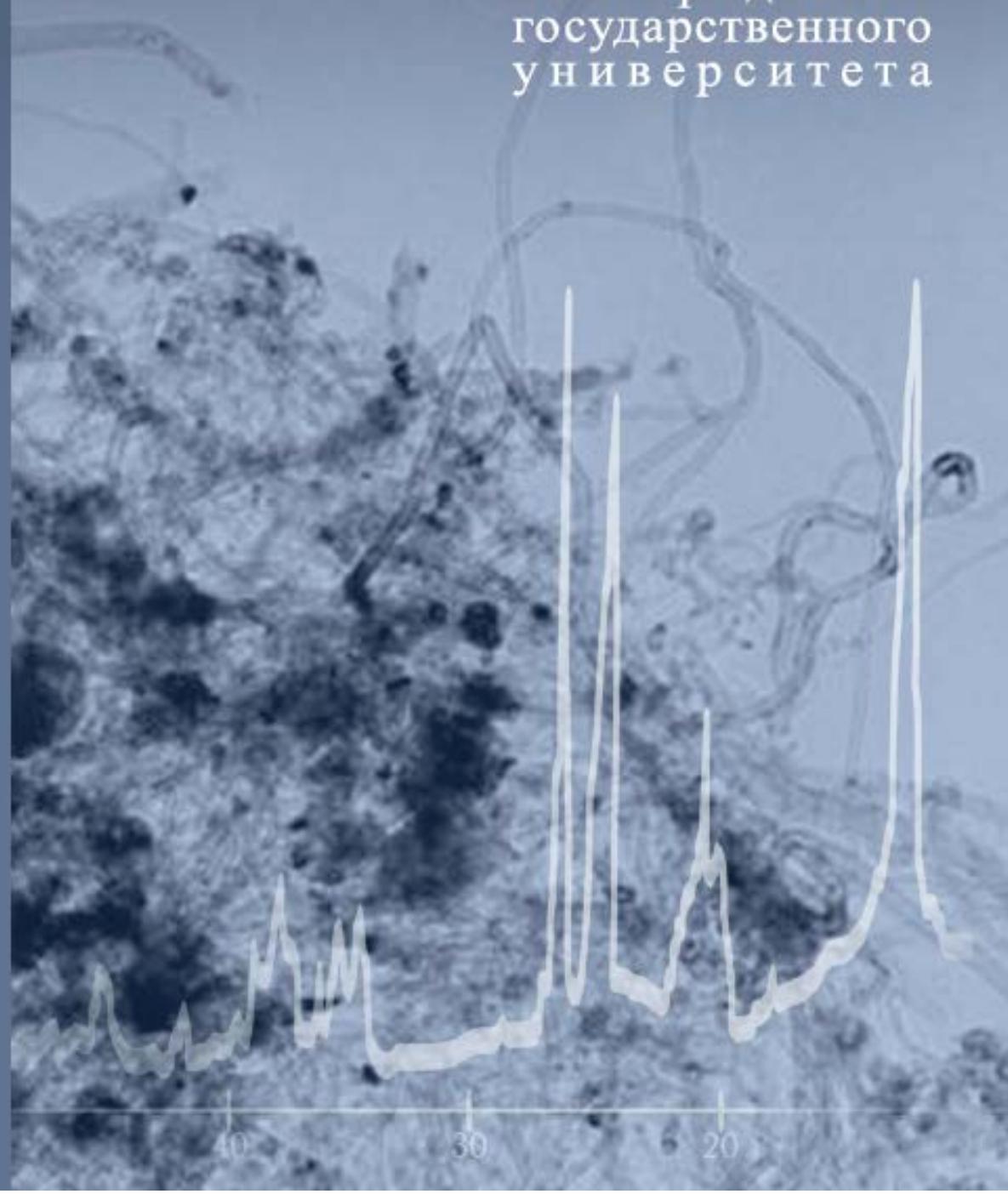
СЕРИЯ
ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ

ВЕЛИКИЙ
НОВГОРОД

1(135)'2024

ВЕСТНИК

новгородского
государственного
университета





НОВГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-8052

Серия «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

1(135)/2024

Главный редактор
ЕФРЕМЕНКОВ А. Б., д.т.н., доцент

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

БИЧУРИН М. И., д.ф.-м.н., проф.,
научный редактор (Великий Новгород, Россия)
ЗАХАРОВ А. Ю., д.ф.-м.н., проф.,
научный редактор (Великий Новгород, Россия)
ПЕТРОВ В. М., д.т.н., проф.,
ответственный секретарь (Великий Новгород, Россия)
АВЕРКИЕВ Н. С., д.ф.-м.н., проф.
(Санкт-Петербург, Россия)
БУГАЁВ А. С., д.ф.-м.н., проф., академик РАН
(Москва, Россия)
БЫСТРОВ Н. Е., д.т.н., доцент,
(Великий Новгород, Россия)
ГАВРУШКО В. В., д.т.н., проф.
(Великий Новгород, Россия)
ЕДЕМСКИЙ В. А., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)
ЗАВОРОТНЕВ Ю. Д., д.ф.-м.н., с.н.с.
(Донецк, Россия)
ЗАХАРОВ М. А., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)
КАРТАШИНСКАЯ Е. С., д.хим.н. (Донецк, Россия)
МАЛАШЕНКО В. В., д.ф.-м.н., проф.
(Донецк, Россия)
НЕМОВ С. А., д.ф.-м.н., проф.
(Санкт-Петербург, Россия)
ПЕТРОВ Р. В., д.ф.-м.н., доцент
(Великий Новгород, Россия)
RASSOLOV V. A., PhD., prof.
(Columbia, South Carolina, USA)
САМСОНОВ В. М., д.ф.-м.н., проф. (Тверь, Россия)
УЧАЙКИН В. В., д.ф.-м.н., проф.
(Ульяновск, Россия)
ЭМИНОВ С. И., д.ф.-м.н., проф.
(Великий Новгород, Россия)
WANG YAOJIN, PhD, prof. (Nankin, China)

Учредитель и издатель –
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого»

Адрес редакции и издателя:
173003, Россия, Великий Новгород,
ул. Большая Санкт-Петербургская, 41, ауд. 1308
Факс: +7(8162) 974526; Тел.: (8162) 33-88-30
E-mail: vestnik@novsu.ru
<https://vestnovsu.elpub.ru/>

**ВЕСТНИК НОВГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**
2024. №1(135).

Оригинал-макет подготовлен редакцией
журнала «Вестник НовГУ»
Технический секретарь О. А. Малухина
Верстка Д. А. Ванюшкин
Художественное оформление В. В. Попович
Дизайн обложки И. А. Чижикина

Свидетельство ПИ № 77-17766 от 10.03.2004 г.
Министерства Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций

Выходит не менее четырех раз в год

Подписано в печать 29.03.2024 г.
Дата выхода 30.03.2024 г.
Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Тираж 500 экз. Усл. печ. л. 17,90. Уч.-изд. л. 7,95.

Отпечатано: ИП Копыльцов П.И.,
394052, Россия, Воронеж,
ул. Маршала Неделина, 27, кв. 56



(16+)
© Вестник НовГУ, 2024



Chief Editor

EFREMENKOV A. B., Dr of Engineering, Assoc. Prof.

EDITORIAL BOARD:

BICHURIN M. I., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

ZAKHAROV A. Yu., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Science Editor (Veliky Novgorod, Russia)

PETROV V. M., Dr of Engineering, Prof.,
Executive Editor (Veliky Novgorod, Russia)

AVERKIEV N. S., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Saint Petersburg, Russia)

BUGAYOV A. S., Dr of Physics and Mathematics,
Prof., Member of Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

BYSTROV N. E., Dr of Engineering, Assoc. Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

GAVRUSHKO V. V., Dr of Engineering, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

EDEMSKIY V. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

ZAVOROTNEV Yu. D., Dr of Physics and Mathematics,
senior researcher (Donetsk, Russia)

ZAKHAROV M. A., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

KARTASHYNSKAYA E. S., Dr of Chemistry
(Donetsk, Russia)

MALASHENKO V. V., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Donetsk, Russia)

NEMOV S. A., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Saint Petersburg, Russia)

PETROV R. V., Dr of Physics and Mathematics,
Assoc. Prof. (Veliky Novgorod, Russia)

RASSOLOV V. A. – PhD., Prof. (Columbia,
South Carolina, USA)

SAMSONOV V. M., Dr of Physics and Mathematics,
Prof. (Tver', Russia)

UCHAIKIN V. V., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Ulyanovsk, Russia)

EMINOV S. I., Dr of Physics and Mathematics, Prof.
(Veliky Novgorod, Russia)

WANG YAOJIN, PhD, Prof. (Nankin, China)

Founder and Publisher – Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
"Yaroslav-the-Wise Novgorod State University"

Postal address:

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
Russia, 173003, Veliky Novgorod,
ul. Bolshaya Sankt-Peterburgskaya, 41, room 1308
Fax: +7(8162) 974526; Tel.: (8162) 33-88-30
E-mail: vestnik@novsu.ru
<https://vestnovsu.elpub.ru/>

VESTNIK OF NOVGOROD STATE UNIVERSITY
2024. №1(135).

Camera-ready copy is prepared by the Journal
Vestnik NovSU editorial staff
Technical editor O. A. Maluchina
Layout D. A. Vanyushkin
Art work V. V. Popovich
Cover design I. A. Chizhikova

Printed publication license no. 77-17766
of 10 March, 2004, issued by Ministry
of the Russian Federation for Affairs of the Press,
Television and Radio Broadcasting and Mass
Communication Media

The journal is published quarterly.

Signed to print on 29.03.2024.
Publication date 30.03.2024.
Sheet size 60×84 1/8. Offset printing.
Number of printed copies: 500.
Conventionally printed sheet 17,90.

Printed by IP Kopyltsov P.I.
Russia, 394052, Voronezh, ul. Marshala
Nedelina, 27-56



СОДЕРЖАНИЕ

Обращение к читателям	5
-----------------------	---

Электроника

<i>Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А.</i> Корреляционный анализ зависимости установленного количества тона в отраженной спектральной (цветовой) группе и коррозионной стойкости однофазных сплавов систем Ni-Cr-Mo: X30H60M9, Hastelloy G-35 с ГЦК решеткой матрицы	9
<i>Осинний Н. А., Петров Д. А.</i> Проектирование печатной платы с контактным устройством для контроля параметров серийно-выпускаемых транзисторов	23
<i>Терехов С. В.</i> Расчет теплоемкостей сложных оксидов	31

Радиотехника и связь

<i>Гареев В. М., Гареев М. В., Калитов М. А., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А.</i> Телевизионная спектральная визуализация и обработка изображений в исследованиях бумажной основы исторических документов	43
<i>Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А.</i> Частотно-территориальное планирование транкинговых систем связи	57

Радиофизика

<i>Гаврушко В. В., Григорьев А. Н., Кадрив О. Р.</i> Стенд для исследования температурной зависимости интегральной токовой чувствительности фотоприемников	69
<i>Евстигнеев Д. А., Корнышев Н. П.</i> Исследование модификации карбида кремния методами лучевой эрозии в условиях фазового состава атмосферы: обзор	76
<i>Калитов М. А.</i> О применении спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании земли	95
<i>Шергин С. С., Скрыпов М. А.</i> Радиофизические методы идентификации осевой асимметрии теплопередачи в замкнутых системах с локализованными фазовыми переходами	108

Физика конденсированного состояния

<i>Гордей М. М., Метлов Л. С.</i> Разработка теоретической модели отжига для двухкомпонентных систем	123
<i>Метлов Л. С.</i> Некоторые аспекты неравновесной эволюционной термодинамики вакансий	128
<i>Никитин А. О.</i> Математическая модель поведения слоистой мультиферроидной структуры в неоднородных электрических полях в области сверхвысоких частот	137
<i>Требования к публикации статей в научном журнале «Вестник НовГУ»</i>	154

CONTENTS

Address to readers	5
--------------------	---

Electronics

<i>Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A.</i> Correlation analysis of the dependence of the established amount of tone (hue) in the reflected spectral (color) group and the corrosion resistance of alloys of the Ni-Cr-Mo system: Kh30N60M9, Hastelloy G-35 with fcc – lattice	9
<i>Osinniy N. A., Petrov D. A.</i> Design of a printed board with a contact device to control the parameters of serial produced transistors	23
<i>Terekhov S. V.</i> Calculation of the heat capacities of complex oxides	31

Radiotechnics and telecommunications

<i>Gareev V. M., Gareev M. V., Kalitov M. A., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A.</i> Television spectral visualization and image processing in research on the paper basis of historical documents	43
<i>Ivanov V. S., Uvaysov S. U., Ivanov I. A.</i> Frequency-territorial planning of trunking communication systems	57

Radiophysics

<i>Gavrushko V. V., Grigoriev A. N., Kadrov O. R.</i> Stand for studying the temperature dependence of the integral current sensitivity of photodetectors	69
<i>Evstigneev D. A., Kornyshev N. P.</i> Study of the silicon carbide modification by radiation erosion methods in the context of the atmosphere phase composition: a review	76
<i>Kalitov M. A.</i> About the application of multispectral visualization in earth remote sensing	95
<i>Shergin S. S., Skrypov M. A.</i> Radiophysical methods of identification of axial asymmetry of heat transfer in closed systems with localized phase transitions	108

Condensed matter physics

<i>Gordei M. M., Metlov L. S.</i> Development of the theoretical annealing model for two-component systems	123
<i>Metlov L. S.</i> Some aspects of the nonequilibrium evolution thermodynamics for vacancies	128
<i>Nikitin A. O.</i> Mathematical model of behavior of a layered multiferroic structure in inhomogeneous electric fields in the microwave region	137
<i>Requirements for publishing articles in the scientific journal "Vestnik NovSU"</i>	154

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ

Уважаемые авторы и читатели журнала «Вестник НовГУ»!

Рады представить Вашему вниманию первый в 2024 году выпуск журнала «Вестник Новгородского государственного университета», серия «Технические науки».

2024 год – юбилейный для нашего издания: журнал был зарегистрирован и начал отсчет своего существования с 10 марта 1994 года! Подчеркивая значимость науки и научных изданий, а также накопив значительный научный потенциал, в университете учредили научно-теоретический и прикладной журнал, который и сейчас является дискуссионной площадкой для обсуждения актуальной научной повестки.

В своем развитии научное издание менялось, умножая свой вес в профессиональном сообществе и расширяя читательскую аудиторию. Благодаря расширенному составу редакционной коллегии в некоторые периоды своего существования журнал издавался по экономическим, педагогическим, гуманитарным, сельскохозяйственным наукам. С 2018 года основной фокус научного интереса был сосредоточен на статьях по техническим и медицинским наукам. Именно эти направления всегда были стратегическими маяками развития университета, что подтверждается не только многочисленными научными группами и лабораториями, студенческими научными обществами по указанной тематике, но действующими диссертационными советами, способствующими подготовке кадров высшей категории.

Так, редколлегия по техническим наукам состоит из 19 докторов технических и физико-математических наук, по медико-биологическим наукам – из 22 докторов наук, в том числе 8 академиков. Обращаясь к библиометрическим и наукометрическим показателям, отметим положительную динамику развития научного журнала. Показатель журнала в рейтинге SCIENCE INDEX вырос до 3,816, процентиль журнала в рейтинге составил 45 (из 100): чем меньше этот показатель, тем ближе журнал к началу рейтинга. Благодаря более четкой редакторской стратегии, улучшилось «качество» авторов: серьезно расширилась их география (индекс Херфиндаля по организациям авторов упал с 5706 в 2013 году до 2972 в 2022), увеличилось количество новых авторов, привлекаются авторы с более высоким индексом Хирша (6,5 в 2022 году) при сохранении среднего возраст менее 50 лет. Это свидетельствует о соблюдении некоего паритета при приеме статей – молодые исследователи наравне с состоявшимися авторами могут быть опубликованы в журнале. Авторы из ведущих научных центров и научно-образовательных организаций стали регулярно публиковать результаты своих научных исследований на страницах журнала «Вестник НовГУ». Вследствие такого редакционного подхода обеспечено повышение интереса читателей

к журналу, о чем свидетельствует рост числа просмотров до 16 591; возросшее до 7,7 время полужизни статей из журнала, процитированных в текущем году, увеличение количества цитирований, в том числе в журналах из ядра РИНЦ.

Закономерным следствием улучшения показателей стало признание издания в научной профессиональной среде: журналу «Вестник НовГУ» присвоена вторая категория в Перечне ВАК, он является одним из 17 изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по специальности 1.3.4. Радиофизика (технические науки). Журнал продолжает развиваться и расширяет перечень научных специальностей: с 11.12.2023 ВАКовскими стали еще две востребованные и перспективные с точки зрения науки специальности:

- 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки),
- 2.2.7. Фотоника (технические науки).

Профессиональная редколлегия журнала и квалифицированная редакция, рецензенты, которые неустанно отбирают только лучшие материалы для публикации – весь этот симбиоз обеспечивает «Вестнику НовГУ» прогресс и творческое развитие все эти 30 лет!

Мы с удовольствием представляем Вам научных редакторов технического направления журнала – профессора Мирзу Имамовича Бичурина и профессора Анатолия Юльевича Захарова, а также бессменного ответственного секретаря журнала профессора Владимира Михайловича Петрова, которые сами являются признанными в научном сообществе учеными, а также успешными и весьма результативными просветителями науки. Выражаем нашим коллегам искреннюю благодарность и желаем продуктивного научного поиска и дерзновенных планов, крепкого здоровья и творческого вдохновения!

В день выхода этого выпуска (30.03.2024) профессор Мирза Имамович Бичурин празднует свой день рождения. От души его поздравляем и желаем здоровья и благосостояния, неиссякаемой энергии и новых научных достижений!

Напоминаем нашим авторам и читателям, что ждем Ваши предложения и материалы для публикации в научном журнале «Вестник Новгородского государственного университета» по адресу электронной почты vestnik@novsu.ru.

Главный редактор научного журнала «Вестник НовГУ»,
проректор по научной работе НовГУ, д.т.н.

А. Б. Ефременков

ADDRESS TO READERS

Dear colleagues and readers of Vestnik NovSU!

We are pleased to present the first issue of the journal “Vestnik NovSU” in 2024, the series “Engineering Sciences”.

The year 2024 is an anniversary year for our journal which was registered and began its existence on March 10, 1994! Emphasizing the importance of science and scientific publications, as well as having accumulated significant scientific potential, the university has established a scientific, theoretical and applied journal, which is still a discussion platform for discussing the current scientific agenda.

In its development, the scientific publication has changed, multiplying its weight in the professional community and expanding the readership. Due to the expanded editorial board, in some periods of its existence, the journal was published in economic, pedagogical, humanitarian and agricultural sciences. Since 2018, the main focus of scientific interest has been on articles on engineering and medical sciences. It is these areas that have always been strategic beacons of the university’s development, which is confirmed not only by numerous scientific groups and laboratories, student scientific societies, but also by existing dissertation councils that contribute to the training of the highest category of personnel.

Therefore, the editorial board for engineering sciences consists of 19 Doctors of Engineering, Physics and Mathematics, for biomedical sciences – of 22 Doctors of Sciences, including 8 academicians. Turning to bibliometric and scientometric indicators, we note the positive dynamics of the scientific journal development. The rate of the journal in the SCIENCE INDEX rating has increased to 3,816, the percentile of the journal in the rating was 45 (out of 100): the lower this indicator, the closer the journal is to the top of the rating. Thanks to a clearer editorial strategy, the “quality” of authors has improved: their geography has significantly expanded (the Herfindahl index for authors’ organizations fell from 5.706 in 2013 to 2.972 in 2022), the number of new authors has increased, authors with a higher Hirsch index (6.5 in 2022) are attracted while maintaining an average age of less than 50 years. This indicates that a certain parity is observed when accepting articles – young researchers, along with established authors, can be published in the journal. Authors from leading scientific centers and scientific and educational organizations began to regularly publish the results of their scientific research on the pages of the journal “Vestnik NovSU”. As a result of this editorial approach, readers’ interest in the journal has increased, as evidenced by an increase in the number of views to 16.591; the half-life of articles from the journal cited this year increased to 7.7, and an increase in the number of citations, including in journals from the core of the RSCI.

A logical consequence of the improvement in indicators was the recognition of the publication in the scientific professional community: the journal “Vestnik NovSU” was assigned the second category in the List of the Higher Attestation Commission, it is one of 17 publications in which the main scientific results of dissertations for the scientific degree of candidate and doctor of science in the specialty should be published 1.3.4. Radiophysics (technical sciences). The journal continues to develop and expands the list of scientific specialties: from December 11, 2023, two more popular and promising specialties in the context of science became HAC:

1.3.8. Condensed matter physics (physical and mathematical sciences),

2.2.7. Photonics (technical sciences).

The professional editorial board of the journal and qualified editorial staff, reviewers who tirelessly select only the best materials for publication – all this symbiosis has ensured Vestnik NovSU progress and creative development all these 30 years!

We are pleased to introduce you to the scientific editors of the technical direction of the journal – Professor Mirza Imamovich Bichurin and Professor Anatoly Yulievich Zakharov, as well as the permanent executive secretary of the journal Professor Vladimir Mikhailovich Petrov, who themselves are recognized scientists in the scientific community, as well as successful and very effective educators of science. We express our sincere gratitude to our colleagues and wish them productive scientific research and daring plans, good health and creative inspiration!

On the issue release day (March 30, 2024), Professor Mirza Imamovich Bichurin celebrates his birthday. We sincerely congratulate him and wish him health, wealth, boundless energy, and new scientific achievements!

We remind our authors and readers that we are waiting for your suggestions and materials for publication in the scientific journal “Vestnik NovSU” by email vestnik@novsu.ru.

*Chief Editor of the scientific journal “Vestnik NovSU”,
Vice-Rector for Research of NovSU, Dr.*

Andrey Efremenkov

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 535-2+620.193

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).9-22

ГРНТИ 29.21.26+81.33.07

Специальность ВАК 2.2.2; 1.3.8

Научная статья

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УСТАНОВЛЕННОГО КОЛИЧЕСТВА ТОНА В ОТРАЖЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ (ЦВЕТОВОЙ) ГРУППЕ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОДНОФАЗНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМ NI-CR-MO: Х30Н60М9, HASTELLOY G-35 С ГЦК РЕШЕТКОЙ МАТРИЦЫ

Михайлов Д. Л.^{1, 2}, Ермишкин В. А.², Минина Н. А.²

¹ ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия)

² Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия)

Аннотация В настоящей статье обсуждаются результаты корреляционного анализа между показателями (параметрами) установленного количества тона в спектральной группе отраженного видимого света и коррозионной стойкости для однофазных никелевых сплавов систем Ni-Cr-Mo: Х30Н60М9, Hastelloy G-35, имеющих структуру твердого раствора. Исходными данными для анализа явились данные, полученные в результате анализа тоновых составляющих отраженного видимого света путем расчета длины волны отраженного света. Разработанным ПО (софтом) были оценены количества тона в участвующих цветовых группах, отраженного видимого света, где тон оценивают по длинам волн, определяя участвующие цветовые группы. Далее количество тона, определенное в цветовой группе, пересчитывают на количество элементов изображения – пикселей, предлагая уже плотность тона в цветовой группе. Показатели скоростей коррозии были определены стандартным гравиметрическим способом, согласно ASTM G-28 «А». Соответствие параметров: тона и скоростей коррозии для рассматриваемых сплавов после различных термических обработок указало на их высокую отрицательную связь. Установленный факт позволяет утверждать, что большее значение тона определенное для пиксел фрагмента характеризует меньшую скорость коррозии, лучшую коррозионную стойкость в одинаковых условиях испытаний. Показатель коэффициент корреляции определен на уровне – 0,93.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, количество тона, отраженный видимый свет, пиксел, длина волны, электроотрицательность, моль

Для цитирования: Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А. Корреляционный анализ зависимости установленного количества тона в отраженной спектральной (цветовой) группе и коррозионной стойкости однофазных сплавов систем Ni-Cr-Mo: Х30Н60М9, Hastelloy g-35 с ГЦК решеткой матрицы // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 9-22. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).9-22

Research Article

CORRELATION ANALYSIS OF THE DEPENDENCE OF THE ESTABLISHED AMOUNT OF TONE (HUE) IN THE REFLECTED SPECTRAL (COLOR) GROUP AND THE CORROSION RESISTANCE OF ALLOYS OF THE NI-CR-MO SYSTEM: KH30N60M9, HASTELLOY G-35 WITH FCC – LATTICE

Mikhailov D. L.^{1, 2}, Ermishkin V. A.², Minina N. A.²

Abstract This article discusses the results of a correlation analysis between the indicators (parameters) of the established amount of tone in the spectral group of reflected visible light and corrosion resistance for single-phase nickel alloys of the Ni-Cr-Mo: Kh30N60M9, Hastelloy G-35 systems with a solid solution structure. The initial data for the analysis were the data obtained as a result of the analysis of the tone

components of the reflected visible light by calculating the wavelength of the reflected light. The developed software estimated the amount of tone in the participating color groups, reflected visible light, where the tone is estimated by wavelength, determining the participating color groups. Further, the amount of tone determined in the color group is recalculated by the number of image elements - pixels, already offering the tone density in the color group. Corrosion rates were determined by a standard gravimetric method according to ASTM G-28 "A".

Correspondence of the parameters: tone and corrosion rates for the alloys under consideration after various heat treatments indicated their high negative connection. The established fact allows us to state that a larger tone value determined for the pixel fragment characterizes a lower corrosion rate and better corrosion resistance in identical test conditions. The indicator correlation coefficient is determined at the level of - 0.93.

Keywords: *corrosion resistance, tone quantity, reflected visible light, pixel, wavelength, electronegativity, mol*

For citation: Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A. Correlation analysis of the dependence of the established amount of tone (hue) in the reflected spectral (color) group and the corrosion resistance of alloys of the ni-cr-mo system: kh30n60m9, hastelloy g-35 with fcc – lattice // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 9-22. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).9-22

Введение

Под коррозионной стойкостью понимается способность материала сопротивляться коррозионному воздействию среды. В настоящее время коррозионную стойкость однофазных высоконикелевых конструкционных материалов оценивают гравиметрическим методом. Этот метод используется для определения скорости коррозии, выражение (1), с целью коррозионного контроля. Гравиметрический метод основан на измерении разности массы контрольных металлических образцов до и после экспозиции в коррозионной среде.

Скорость коррозии k (г/м²·ч) вычисляют по формуле:

$$k = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot \tau} \quad (1)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г;

m_2 – масса образца после испытания, г;

S – поверхность образца, м²;

τ – время испытания, ч.

В настоящей работе проводится корреляционный анализ отраженного тона, рассчитанного по данным анализа изображения поверхности в цифровом графическом формате [1] и скорости коррозии, определенной гравиметрическим методом, для высоко-никелевых сплавов системы Ni-Cr-Mo: X30H60M9, Hastelloy G-35, имеющих ГЦК решетку.

Коррозионную стойкость материала прогнозируют с помощью рассчитанного нормированного количества тона в цветовой группе спектра, отнесенного на 1 пиксел, как элемента изображения. Удельный показатель количества тона, Q_{clp} , рассчитанного с помощью программы в координатах «длина волны отраженного видимого света от материала – соответствующее ей количество нормированного тона», определяет состояние параметра – скорости коррозии, характеризующего эксплуатационную пригодность материала.

Ниже приведены графические зависимости, «длина отраженной волны, λ_i , и соответствующее ей количество тона, Q_i », на рисунках 1, 2, 3, 4 и в таблицах 1, 2, 3, 4. Размер (Size) фрагмента изображения для пересчета удельной единицы одинаков для всех изображений и составляет 3300 x 625 пкс. Результаты получены согласно применения тонового метода [1].

Образец № 17, далее обр.17, сплав X30H60M9.



Рисунок 1А. Исходное цветное изображение фрагмента поверхности обр.17

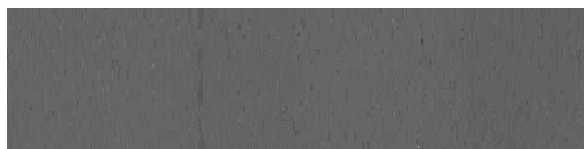


Рисунок 1Б. Серое изображение фрагмента поверхности обр.17

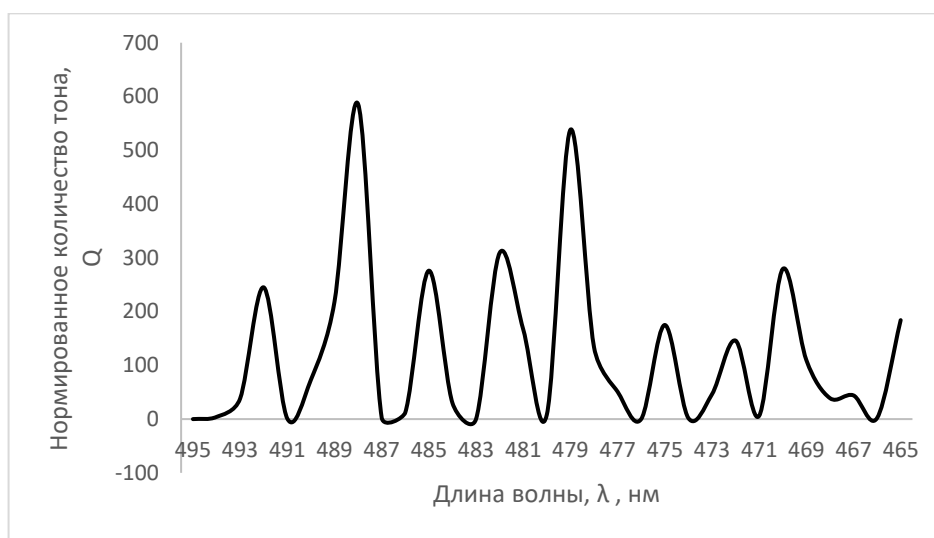


Рисунок 1В. Участие тоновых составляющих в цветовой группе обр. 17, график

Расчетное количество тона на пиксел:

– $Q_{clp\ 17} = S_{\text{тон}}/S_{\text{изобр.}} = 3705,5/(3300 \times 625) = 0,001797$, в цветовой группе синего цвета.

Таблица 1. Тоновые составляющие, полученные софтом, обр.17

λ_i	495	494	493	492	491	490	489	488	487	486	485
Q_i	1	7	31	63	0	156	143	4	17	50	130

λ_i	484	483	482	481	480	479	478	477	476	475
Q_i	81	41	186	224	287	10	272	3	299	345

λ_i	474	473	472	471	470	469	468	467	466	465
Q_i	107	104	7	1	31	0	999	16	83	16

Образец № 1, далее обр.1, сплав Х30Н60М9.



Рисунок 2А. Исходное цветное изображение фрагмента поверхности обр.1

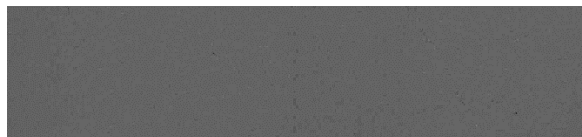


Рисунок 2Б. Серое изображение фрагмента поверхности обр.1

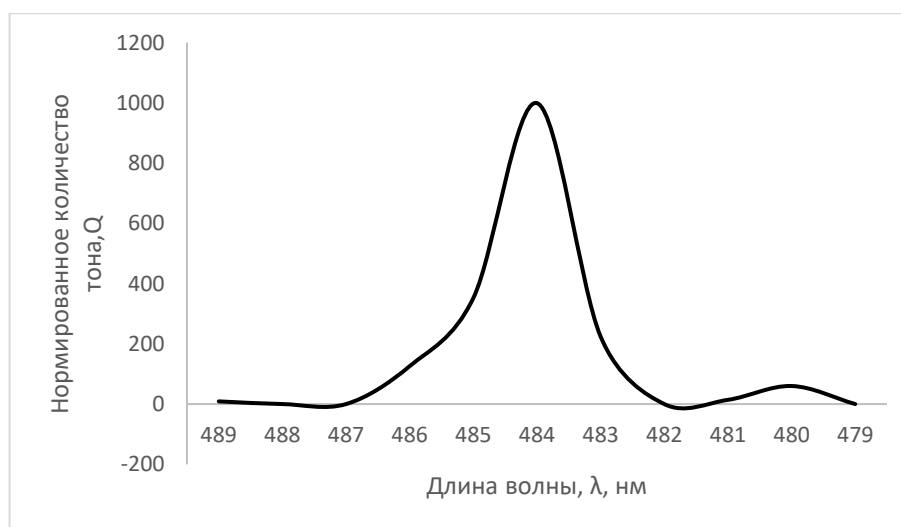


Рисунок 2В. Участие тоновых составляющих в цветовой группе обр.1, график

Таблица. 2. Тоновые составляющие, полученные софтом, обр.1

λ_i	489	488	487	486	485	484	483	482	481	480	479
Q_i	9	0	0	126	352	999	224	0	14	60	0

Расчетное количество тона на пиксел:

- $Q_{clp 1} = S_{\text{тон}}/S_{\text{изобр.}} = 1779,5/(3300 \times 625) = 0,000863$, в цветовой группе синего цвета.

Образец №16, далее обр.16, сплав G-35.



Рисунок 3А. Исходное цветное изображение фрагмента поверхности обр.16

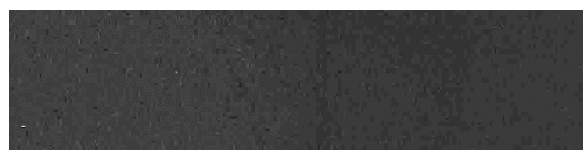


Рисунок 3Б. Серое изображение фрагмента поверхности обр.16

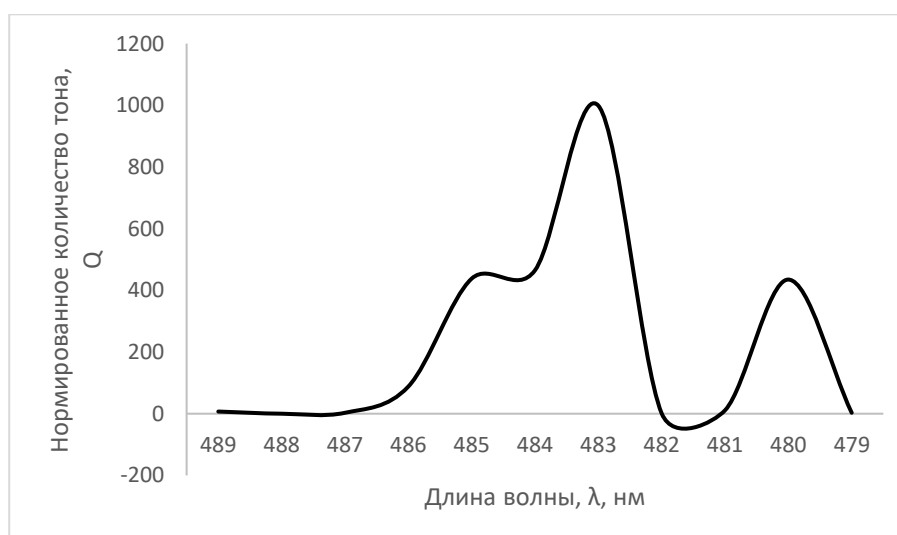


Рисунок 3В. Участие тоновых составляющих в цветовой группе обр.16, график

Таблица 3. Тоновые составляющие, полученные софтом, обр. 16

λ_i	489	488	487	486	485	484	483	482	481	480	479
Q_i	7	0	3	88	438	465	999	1	11	435	3

Расчетное количество тона на пиксел:

- $Q_{clp\ 16} = S_{\text{тон}}/S_{\text{изобр.}} = 2445/(3300 \times 625) = 0,001185$, в цветовой группе синего цвета.

Образец №12, далее обр.12, сплав G-35.



Рисунок 4А. Исходное цветное изображение фрагмента поверхности обр. 12

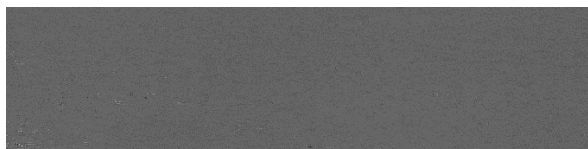


Рисунок 4Б. Серое изображение фрагмента поверхности обр. 12



Рисунок 4В. Участие тоновых составляющих в цветовой группе обр. 12, график

Таблица 4. Тоновые составляющие, полученные софтом, обр.12

λ_i	493	492	491	490	489	488	487	486	485	484	483
Q_i	12	38	14	124	122	181	349	326	675	999	548

λ_i	482	481	480	479	478	477	476	475	474
Q_i	365	284	204	140	101	63	40	19	13

Расчетное количество тона на пиксел:

- $Q_{clp 12} = S_{\text{тон}}/S_{\text{изобр.}} = 4604,5/(3300 \times 625) = 0,002232$, в цветовой группе синего цвета.

Авторским коллективом метод [1] предлагается как более удобный качественный метод оценки в сравнении со стандартной методикой. Метод играет существенную роль в оценке скорости коррозии, а значит в корректировке режимов термической обработки [2] для поиска оптимальной необходимой структуры твердого раствора материала сплава, таким образом, оценивая его структурное состояние до воздействия реакционной среды. Этот метод более информативен, менее затратен для получения необходимого технологического результата.

По причине новизны идеи оценки параметров коррозии с помощью количества отраженного тона, данных по корреляционному анализу этих переменных (тон – независимая, скорость коррозии – зависимая переменная) ни в отечественных, ни в зарубежных источниках найдено не было.

Исследуемые материалы и методы исследования

В настоящей работе исследовались образцы коррозионностойких металлических материалов – никелевых композиций, сплавов Х30Н60М9 [3], Hastelloy G-35, структуры обоих зафиксированы в однофазном состоянии закалкой, закалочные мероприятия проведены при температурах 1107°C и 1121°C, соответственно, охлаждением в воду, $T_{\text{воды}} = 23^\circ\text{C}$. Данные о химическом составе образцов исследованных сплавов приведены в таблице 5.

В настоящее время оптическая спектроскопия стала важным источником информации о структурном и энергетическом состоянии поверхности исследуемых материалов.

Таблица 5. Химические составы сплавов X30H60M9 и G-35

Сплав	Элементный состав, мас. %											
	Ni	Cr	Mo	Al	Fe	Mn	C	La	B	Si	S	P
№ 1	Осн.	29,6	8,75	0,21	0,01	0,003	0,006	0,002	0,00	0,018	0,0025	0,0074
№2	Осн.	33,28	8,13	0,14	0,64	0,21	0,006	0,00	0,002	0,04	0,002	0,002

Примечание: сплав № 1 – сплав X30H60M9, шифр «Раствор-Н» (изготовитель: ФГУП «ВИАМ», Москва, Россия); сплав № 2 – сплав Hastelloy G-35 (изготовитель: HAYNES, США).

Авторским коллективом было высказано мнение, что характеристикой структурного состояния, в части коррозионной стойкости, может являться чистый цвет образца, как характеристика распределения ионного заряда по его поверхности.

Известно, что для оценки состояния химической связи используются электроотрицательность (ЭО), как мера отрицательности материала, характеризующая способность валентных электронов, создавать локальные зоны с повышенными концентрациями заряда (теория коллективизированных электронов). Необходимо отметить, что электроотрицательность в сочетании с другими факторами позволяет установить конкретные значения большинства физических и физико-химических свойств для металлических материалов сплавов [4].

Ранее, Бацановым С. С. [5] было подтверждено, что насыщенность электронного газа аналогична ионности связи, которая в свою очередь определяется энергией связи. Характеристикой этого является ионизационный потенциал. Следовательно, установив различие молярной ЭО сравниваемых сплавов, сможем подтвердить различие электрохимического характера элементов: насыщенности электронного газа, соответственно, электронных плотностей атомов, ионизационного потенциала, что определит различие в коррозионной стойкости сплавов.

В термодинамике растворов изменение энергии Гиббса называется энергией смешения. На основании этого можем заключить, что химические потенциалы компонентов твердого раствора характеризует состояние энергии Гиббса. Для энергии Гиббса (G) одного моля твердого раствора можно записать:

$$G = X(1)\mu(1) + X(2)\mu(2) + \dots + X(i)\mu(i), \quad (2)$$

где $X(1)$, $X(2)$, $X(i)$ – молярные доли компонентов раствора; $\mu(1)$, $\mu(2)$, $\mu(i)$ – их химические потенциалы.

Известно, что в проекции свободной энергии Гиббса химический (μ) и электрический (φ) потенциалы взаимозаменяемы. Введение же электрического потенциала полезно при анализе процессов переноса заряда в растворах. Это

возможный способ использования электрического потенциала в электрохимической термодинамике.

Подтверждая вышеизложенное, отметим, что показатели электроотрицательностей необходимо рассматривать как показатели электрических потенциалов зарядов, соответственно, суммарный потенциал электрического поля системы зарядов будет равен скалярной сумме потенциалов электрических полей каждого из зарядов в отдельности (принцип суперпозиции), здесь потенциал электрического поля как характеристика энергосостояния.

$$\varphi(\sum) = \varphi(1) + \varphi(2) + \varphi(3) + \dots + \varphi(i), \quad (3)$$

На основании этого молярная ЭО сплава была установлена суммой произведений молярных долей и ЭО компонент.

Для электроотрицательности одного моля (χ_m), твердого раствора запишем:

$$\chi_m = X(1)\chi(1) + X(2)\chi(2) + \dots + X(i)\chi(i), \quad (4)$$

где $X(1)$, $X(2)$, $X(i)$ – молярные доли компонентов раствора; $\chi(1)$, $\chi(2)$, $\chi(i)$ – электроотрицательности.

Для моль вещества сплавов X30H60M9 и G-35, были выполнены следующие расчеты (таблицы 6, 7).

Таблица 6. Вычисление молярных масс сплавов X30H60M9, G-35

X30H60M9	Молярная доля элемента	Атомная масса, m_a , г/моль	Молярная масса элемента, M_i , г/моль
Ni	0,638	58,693	37,446
Cr	0,293	51,996	15,235
Mo	0,069	95,95	6,621
	1		$\sum 59,302$
G-35			
Ni	0,592	58,6934	34,7465
Cr	0,348	51,9961	18,095
Mo	0,06	95,95	5,757
	1		$\sum 58,598$

Примечание: Доля молярной единицы определена из пересчета атомных процентов, их долей от единицы (таблицу 5)

Таблица 7. Вычисление ЭО молей сплавов Раствор-Н, G-35

X30H60M9	Молярная доля эл-та	χ	ЭО m_i	V_m , см ³	ЭО m/V_m , моль ⁻¹
Ni	0,638	1,8	1,148		
Cr	0,293	2,2	0,645		
Mo	0,069	2,1	0,145		
			$\Sigma 1,938$	7,206	0,267 $\approx$ 0,27
G-35					
Ni	0,592	1,8	1,066		
Cr	0,348	2,2	0,766		
Mo	0,06	2,1	0,126		
			$\Sigma 1,957$	7,146	0,274 $\approx$ 0,27

Примечание:

- Электроотрицательность участников химических композиций для сплавов X30H60M9 и G-35, по Томасу-Горди [6].
- Плотности сплавов измерены экспериментально: для X30H60M9, $\rho(1) = 8300$ кг/м³ (8,3 г/см³), для G-35(2), $\rho(2) = 8200$ кг/м³ (8,2 г/см³).
- молярный объем (V_m) определен по формуле: $V_m = \sum M_i / \rho$, где ρ – плотность сплава, соответственно, для сплава X30H60M9, индекс - (1); $V_m(1) = 7,20556$ см³, для сплава G-35, - индекс (2); $V_m(2) = 7,14611$ см³
- Показатель ЭО для моля сплава X30H60M9 запишем выражением: $\phi(1) = \text{ЭО}(1)/V_m(1) = 0,271$ см³/моль⁻¹, для G-35(2), $\phi(2) = \text{ЭО}(2)/V_m(2) = 0,274$ см³/моль⁻¹.

Очевидно, что для значений ЭО молей сравниваемых сплавов справедливо выражение:

$$\phi(1) \leq \phi(2), \quad (5)$$

Таким образом, используя выражение (5), отметим, что большей ЭО для сравниваемых структур сплавов X30H60M9 и G-35 обладает сплав G-35, что подтверждает различие в ионизационном потенциале, соответственно, коррозионной стойкости.

В качестве примера реализации предлагаемой оценки коррозионной стойкости металлических материалов рассмотрим вариант с никелевыми сплавами системы Ni-Cr-Mo, X30H60M9 и Hastelloy G-35, химический состав которых приведен в таблице 1, находящимися в структурных состояниях твердого раствора.

В настоящее время материал сплава Hastelloy G-35(HAYNES), далее Hastelloy G-35 предлагается в качестве конструкционного, коррозионностойкого к окислительным средам в условиях повышенных температур, до 700°C. Разработанный сплав X30H60M9 сейчас предлагается для отечественной металлургии к освоению как перспективный жаропрочный материал с улучшенными пластическими свойствами в сочетании с превосходными коррозионными

свойствами, конкурентноспособный импортному сплаву Hastelloy G-35 по качественным и стоимостным характеристикам.

В настоящее время оценку коррозионных свойств материалов данного класса, стойких к окислительным средам, производят согласно ASTM G-28 «А» [7], как стандартной методики. Испытания производят в кипящем (выдержка 120 часов) испытательном растворе – 50% H_2SO_4 , серной кислоты с добавлением сульфата железа (III), как пассиватора для границ. Показатель скорости коррозии рассчитывается посредством убыли массы в процессе испытания.

Обсуждение результатов

Были подготовлены 4 плоских образца материала сплава X30H60M9 и 4 плоских образца сплава Hastelloy G-35. Образцы были термически обработаны по различным режимам на температурах фазового перехода для структуры твердого раствора, в интервалах 1107 – 1135 °С, некоторые были после спровоцированы (имитация сварки) на режиме нагрева 800°С, в течение 30 мин. В соответствии с ГОСТ 6038-2017 размеры образцов составили 80x20x5мм, чистота поверхности составила не менее 0,8 мкм. Далее образцы были одномоментно все 8 образцов были отсканированы, соответственно, в одинаковых условиях. Это подтверждает объективность исходных данных. По факту изображения были переведены в цифровой графический формат. После образцы были исследованы по стандартной методике согласно ASTM G-28 метод «А» [7], кипячение в испытательном растворе (50% $H_2SO_4 + Fe_2(SO_4)_3$) течении 120 часов, исполнитель УрФУ, г. Екатеринбург (4шт.), HAYNES (USA) (3 шт.), АО «НИИК», г. Дзержинск (1 шт.).

Скорости коррозии, определенные опытным путем, согласно предоставленных исполнителями отчетов, имели следующие показатели (таблица 8):

Таблица 8. Экспериментальные данные по скорости коррозии и расчетные данные по количеству тона

№ образца, сплав	Кол-во тона на пиксел, Q clr	Эк, мил/год	Эк, мм/год	Термическая обработка
1, X30H60M9	0,000863	4,72	0,12	Закалка + провокация
16. G-35	0,001185	4,33	0,11	Закалка + провокация
15. X30H60M9	0,001459	3,7	0,094	Закалка
14. G-35	0,001686	3,94	0,1	Закалка
17. X30H60M9	0,001797	3,5	0,089	Закалка
4. X30H60M9	0,001993	3,54	0,09	Закалка
11, G-35	0,002273	3,43	0,087	Закалка + провокация
12, G-35	0,002232	3,39	0,086	Закалка

Примечание: 1 мил = 0,001 дюйма

Проведенный анализ корреляции опытных данных по скорости коррозии и расчетных данных по тону (таблица 8), установил, коэффициент корреляции – $r = -0,93$, соответственно, знак и значение коэффициента подтверждает наличие высокой отрицательной связи.

В таблице 7 приведены расчетные данные, полученные с помощью разработанного софта, как плотности тона на пиксел изображения, для всех 8 образцов. Тоновые составляющие были пересчитаны в цветовой группе синего цвета.

Используя расчетные и экспериментальные данные, приведенные в таблице 8, была установлена зависимость между количеством отраженного тона и скоростью коррозии, представленная на рисунке 5.

Таким образом, установлена и подтверждена экспоненциальная зависимость коррозионной стойкости и тона структур твердого раствора никелевых сплавов с ГЦК решеткой: X30H60M9, Hastelloy G-35.

Согласно данным на рисунке 5,

$$v_k \sim e^{(-Q_{clp})} \quad (6)$$

где v_k – скорость коррозии, Q_{clp} – плотность тона в цветовой группе.

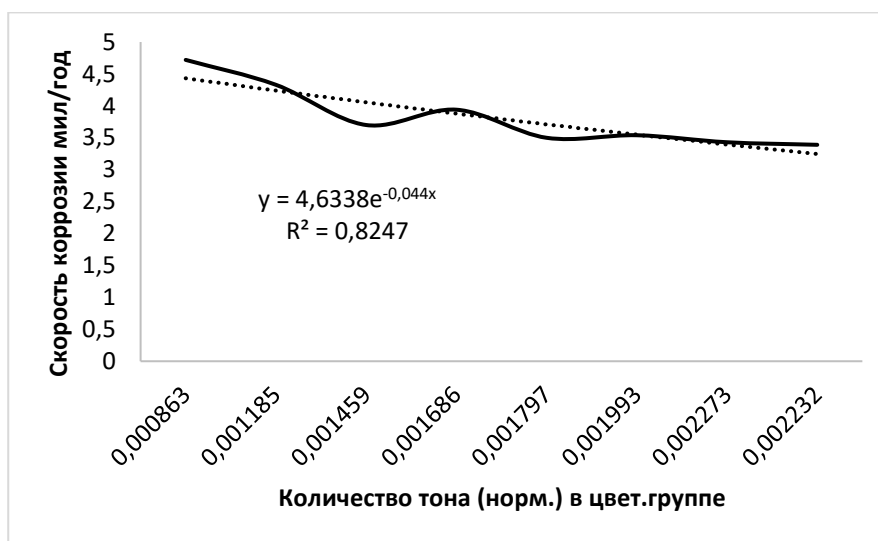


Рисунок 5. Связь количества тона и скорости коррозии для 8 образцов, в цветовой (синей) группе

Выводы

Проведенный в настоящей работе корреляционный анализ установленного количества тона в цветовой группе отраженного видимого света и коррозионной стойкости сплавов системы Ni-Cr-Mo на примере высоконикелевых сплавов X30H60M9 и Hastelloy G-35 (имеющих структуру твердого раствора с ГЦК решеткой) позволил заключить о высокой отрицательной связи этих параметров, с

коэффициентом корреляции $r = -0,93$. Была подтверждена ранее предложенная экспоненциальная зависимость: меньшая плотность отраженного тона в цветовой группе подтверждает бóльшую скорость коррозионного разрушения материала в идентичных условиях, что подтверждает перспективу оценки коррозионной стойкости однофазных сплавов системы Ni-Cr-Mo с ГЦК решеткой отраженным количеством цвета.

Список литературы

1. Михайлов Д. Л., Ермишкин В. А., Минина Н. А., Кулагин С. П. Экспресс-анализ коррозионной стойкости сплавов системы Ni-Cr-Mo (Ni-Cr, Ni-Mo) согласно установленного количества тона в спектральной группе отраженного света // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480
2. Ермишкин В. А., Михайлов Д. Л., Кулагин С. П., Минина Н. А. Влияние термообработки на структуру и свойства хромо-никелевого сплава G-35 // Четвертый Междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии», Москва, 27-30 ноября 2018 г.: сборник материалов: в 3-х т. Т. 1. Москва, 2018. С. 648-653.
3. Михайлов Д. Л. Патент № 2613805 Российской Федерации, МПК C22C 19/05 (2006.01), C22C 30/00 (2006.1). Коррозионно-стойкий сплав на основе никеле: № 2016105314, заявл. 02.17.2016: опубл. 03.21.2017.
4. Резниченко Л. А., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Дудкин С. И., Шилкна Л. А., Позднякова И. В., Сервули В. А. Зависимость степени сегнетожесткости твердых растворов на основе ниобатов натрия-лития от степени ковалентности А-О-связи // Журнал технической физики. 2000. 70(11). 63-66.
5. Бацанов С. С. Электроотрицательность элементов и химическая связь. Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. 196 с.
6. Григорович В. К. Периодический закон Менделеева и электронное строение металлов. Москва: Наука, 1966. 287 с.
7. ASTM G28-02. Standard Test Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloy. 2002. DOI: 10.1520/G0028-02

References

1. Mikhailov D. L., Ermishkin V. A., Minina N. A., Kulagin S. P. Express analysis of the corrosion resistance of alloys of the Ni-Cr-Mo system (Ni-Cr, Ni-Mo) according to the set amount of tone in the reflected-light spectral group // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 470-480. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).470-480
2. Ermishkin V. A., Mikhailov D. L., Kulagin S. P., Minina N. A. Vliyaniye termoobrabotki na strukturu i svoystva khromo-nikelevogo splava G-35 [Effect of heat treatment on the structure and properties of the chromium-nickel alloy G-35] // Fourth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation "New Materials and promising technologies", Moscow, November 27-30, 2018: collection of materials: in 3 volumes. Vol. 1. Moscow, 2018. P. 648-653.
3. Mikhailov D. L. Patent No. 2613805 of the Russian Federation, IPC C22C 19/05 (2006.01), C22C 30/00 (2006.1). Korrozionno-stoykiy splav na osnove nikele [Corrosion-resistant nickel-based alloy]: No. 2016105314, appl. 17.02.2016: publ. 21.03.2017.

4. Reznichenko L. A., Danziger A. Ya., Razumovskaya O. N., Dudkin S. I., Shilkna L. A., Pozdnyakova I. V., Servuli V. A. Zavisimost' stepeni segnetozhestkosti tverdykh rastvorov na osnove niobatov natriya-litiya ot stepeni kovalentnosti A-O-svyazi [Dependence of the degree of ferroelectric hardness of solid solutions based on sodium–lithium niobates on the degree of covalency of the A–O bond] // Technical Physics. 2000. 70(11). 63-66.
5. Batsanov S. S. Elektrootritsatel'nost' elementov i khimicheskaya svyaz' [Electronegativity of elements and chemical bonding]. Novosibirsk: Publishing house Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences USSR, 1962. 196 p.
6. Grigorovich V. K. Periodicheskiy zakon Mendeleyeva i elektronnoye stroyeniye metallov [Mendeleev's periodic law and the electronic structure of metals]. Moscow: Nauka, 1966. 287 p.
7. ASTM G28–02. Standard Test Methods for Detecting Susceptibility to Intergranular Corrosion in Wrought, Nickel-Rich, Chromium-Bearing Alloy. 2002. DOI: 10.1520/G0028-02

Информация об авторах

Михайлов Дмитрий Леонидович – соискатель, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия); директор, ООО «Промдеталь» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-1609-840X, ooopromkey@gmail.com

Ермишкин Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9093-8294, vermishkin@imet.ac.ru

Минина Наталья Анатольевна – старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-3782-3858, minina@imet.ac.ru, minina1951@rambler.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.357

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).23-30

ГРНТИ 31.15.33

Специальность ВАК 2.2.2; 1.3.8

Научная статья

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С КОНТАКТНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СЕРИЙНО-ВЫПУСКАЕМЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Осинний Н. А., Петров Д. А.

АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье рассматривается проект печатной платы контактного устройства, предназначенного для контроля электрических параметров серийно-выпускаемых транзисторов. Это контактное устройство представляет собой двухстороннюю печатную плату. Приведена разработанная схема электрическая принципиальная данного устройства, перечислены компоненты входящие в нее. Описан процесс проектирования печатной платы, включающий в себя несколько этапов. Приведена сделанная топология двухсторонней печатной платы с помощью программы AltiumDesigner. Выделены критерии при проектировании данной топологии. Описаны используемые слои печатной платы. Дальше по созданным Gerber-файлам с использованием высококачественной технологии производства был сделан макет печатной платы. В дальнейшем сделанная таким образом печатная плата может быть использована для тестирования электрических параметров транзисторов.

Ключевые слова: *печатная плата, контактное устройство, транзисторы, топология*

Для цитирования: Осинний Н. А., Петров Д. А. Проектирование печатной платы с контактным устройством для контроля параметров серийно-выпускаемых транзисторов // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 23-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).23-30

Research Article

DESIGN OF A PRINTED BOARD WITH A CONTACT DEVICE TO CONTROL THE PARAMETERS OF SERIAL PRODUCED TRANSISTORS

Osinniy N. A., Petrov D. A.

JSC OKB Planeta (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article discusses the design of a printed circuit board of a contact device designed to control the electrical parameters of serial produced transistors. This contact device is a double-sided printed circuit board. The developed electrical circuit diagram of this device is given, the components included in it are listed. The process of designing a printed circuit board, which includes several stages, is described. The topology of a double-sided printed circuit board made using the Altium Designer program is shown. The criteria for the design of this topology are highlighted. The used circuit board layers are described. Next, based on the created Gerber files, using the high-quality production technology of a printed circuit board layout was made. In the future, a printed circuit board made in this way can be used to test the electrical parameters of transistors.

Keywords: *printed circuit board, contact device, transistors, topology*

For citation: Osinniy N. A., Petrov D. A. Design of a printed board with a contact device to control the parameters of serial produced transistors // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 23-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).23-30

Введение

В настоящее время все более актуальным становится применение в области микроэлектроники кремниевых эпитаксиально-планарных биполярных транзисторов структуры $n-p-n$, поскольку они являются одними из основных элементов интегральных схем. Они превосходят по техническим параметрам транзисторы структуры $p-n-p$. Топология такого вида транзистора может быть асимметричной и симметричной, где коллекторные и базовые электроды симметрично охватывают эмиттер.

Новизной данной работы можно считать то, что при проектировании нашего устройства будет использоваться преимущественно отечественная электронная компонентная база. Данное устройство представляет собой печатную плату. Разработка печатной платы зачастую является сложным процессом. Но с появлением CAD-систем для конструкторского проектирования печатных плат [1, 2] процесс значительно упростился. Одним из таких систем является наиболее популярная программа AltiumDesigner [3, 4], с помощью которой удобно создавать проект топологии печатной платы для производства.

Целью данной работы является проектирование печатной платы для контактного устройства (КУ), предназначенного для контроля электрических параметров серийно-выпускаемых биполярных транзисторов. В ходе работы требуется решить следующие задачи:

- разработка схемы электрической принципиальной;
- создание топологии печатной платы;
- создание печатной платы по технологии.

Разработка схемы электрической принципиальной КУ

Схема электрическая принципиальная представляет собой электрическую схему, которая обозначает полный состав элементов, включая связи между ними, а также дает детальное представление о принципах работы устройства. В отличие от разводки печатной платы данный вид схемы не показывает взаимного расположения компонентов, а только указывает лишь на то, какие компоненты с какими соединяются. Как правило, схема электрическая принципиальная разрабатывается исходя из требований технического задания. От качества ее разработки зависит правильность работы устройства, а также его производительность и надежность в эксплуатации. Схема электрическая принципиальная в нашем случае имеет относительно простой конструктивный вид, поэтому нет никакой необходимости в разработке структурной схемы на устройство. На рисунке 1 приведена разработанная схема электрическая принципиальная проектируемого устройства.

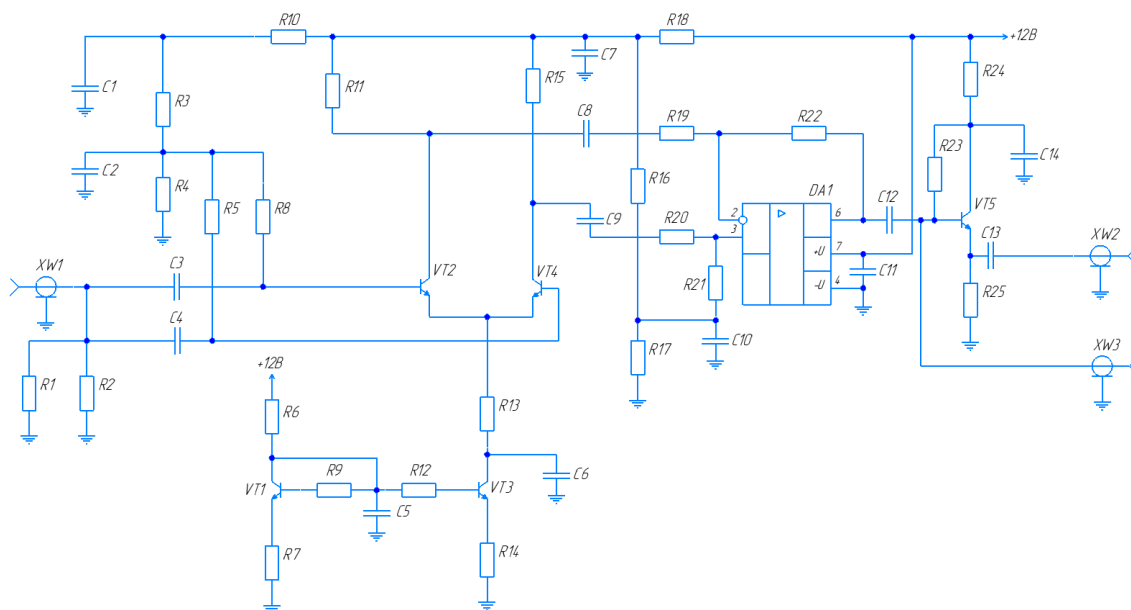


Рисунок 1. Схема электрическая принципиальная КУ

Устройство для контроля параметров серийно-выпускаемых транзисторов будет представлять собой печатную плату, на которой находятся следующие электронные компоненты:

- ВЧ-разъемы (XW1...XW3);
- резисторы (R1...R25);
- конденсаторы (C1...C14);
- операционный усилитель (DA1);
- транзисторы (VT1...VT5).

После разработки схемы электрической принципиальной можно перейти к проектированию печатной платы.

Создание топологии печатной платы

При проектировании КУ учтены следующие конструктивные требования:

- конструктивное исполнение КУ – настольное, тип ВЧ разъемов КУ – SMA (f), разъем питания – одноразрядный штыревой;
- высокочастотные (ВЧ) линии должны быть симметричные;
- маркировка колодки должна содержать: десятичный номер, номер экземпляра колодки;
- интенсивность эксплуатации КУ – 50 тыс. парных транзисторов к КУ подключений в год.

Традиционно процесс проектирования печатной платы включает в себя следующие этапы:

- 1) создание библиотеки условно графических изображений компонентов;
- 2) создание библиотеки посадочных мест;

- 3) создание интегрированной библиотеки;
- 4) разработка схемы электрической принципиальной;
- 5) синхронизация схемы и платы, т.е. перенос элементов из схемы в плату;
- 6) создание топологии печатной платы (размещение компонентов на плате, трассировка, заливка полигоном);
- 7) создание Gerber-файлов [5] – это главные файлы, содержащие описание проекта печатной платы для изготовления фотошаблонов на самом разнообразном оборудовании.

На рисунке 2 приведена топология двухсторонней печатной платы КУ сделанная в программе AltiumDesigner.

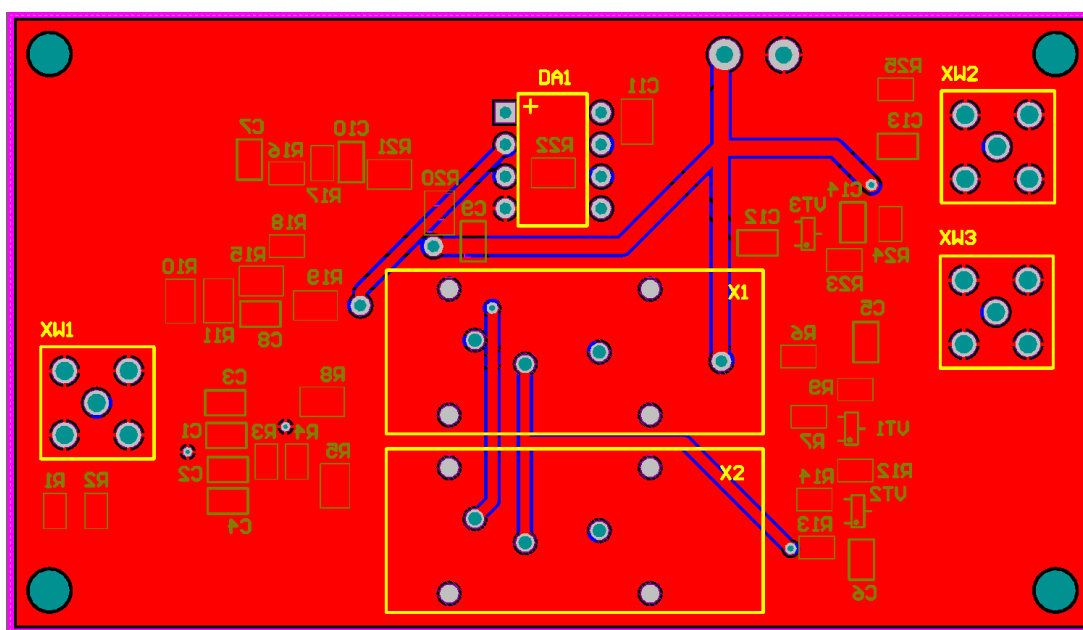


Рисунок 2. Топология печатной платы КУ

Здесь ВЧ линии расположены симметрично согласно требованиям. ВЧ разъемы расположены ближе к краям платы. Переходные отверстия (Via) на плате используются для вертикального соединения слоев платы. Расположение компонентов на плате соответствует тому, как бежит электрический ток на схеме. Дорожки питания +12 В сделаны как можно толще. Размер печатной платы составил 86×49 мм.

При проектировании топологии печатной платы использовались следующие слои.

Top Layer – верхний сигнальный слой, представляющий собой слой меди, который сформирован в отдельные токопроводящие дорожки, и использующийся для создания токопроводящих путей и доступных зон для всех сигналов схемы. Кроме того, при создании контактных площадок для компонентов

поверхностного монтажа, данный слой обычно используется по умолчанию для размещения контактных площадок компонентов.

Bottom Layer – нижний сигнальный слой, который также как и слой *Top* он представляет собой слой меди, но уже на нижней стороне платы. Тут также имеются контактные площадки компонентов, которые расположены на нижней стороне платы.

Top Overlay – слой шелкографии, используется для размещения надписей и графики компонента.

Keep-Out Layer – этот слой используется для выделения границы (контура) печатной платы.

Multi-Layer – слой размещения контактных площадок компонентов.

Сделав топологию платы с помощью готовых Gerber-файлов, которые содержат информацию об используемых слоях, можно перейти к технологии создания печатной платы.

Создание печатной платы по технологии

Существуют несколько видов технологий изготовления двухсторонних печатных плат [6-9]. Одной из таких технологий является лазерная технология, которая используется в настоящее время на специальном для этого оборудовании. Суть данной технологии заключается в изготовлении двухсторонних печатных плат путем механического фрезерования или лазерного структурирования [10].

В качестве примера на рисунке 3 приведена сделанная по данной технологии плата коммутационная.

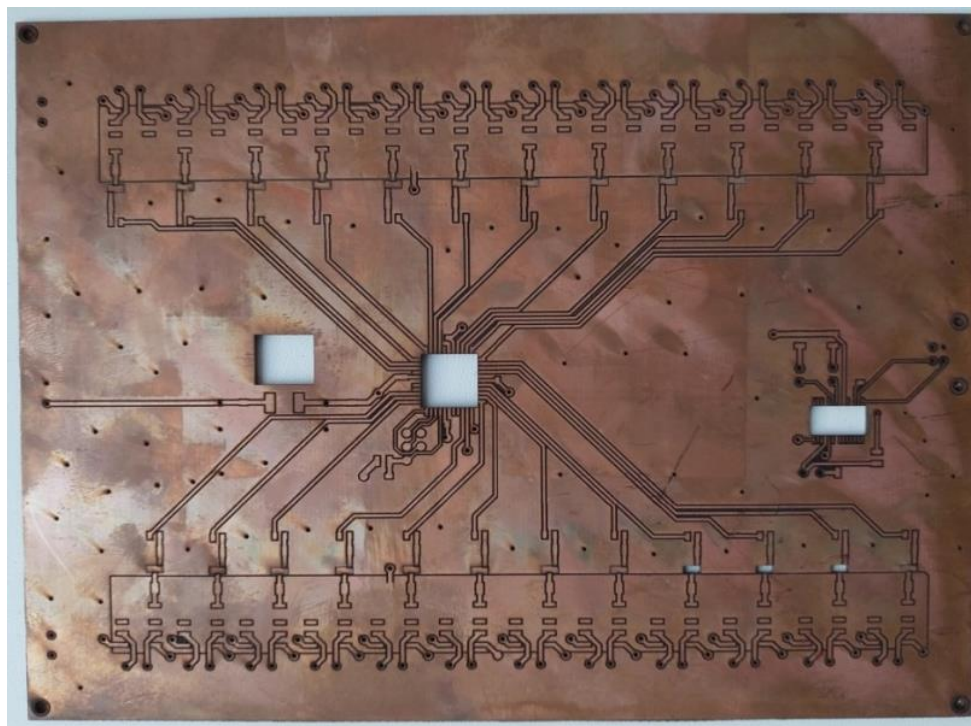


Рисунок 3. Плата коммутационная

В нашей работе будет использоваться не лазерная, а другая более продвинутая совершенствованная технология. Благодаря применению передовых технологий и качественных материалов от проверенных поставщиков доступна возможность изготавливать печатные платы высокого класса точности и уровня качества.

На рисунках 4 и 5 приведены верхняя и нижняя соответственно стороны печатной платы нашего КУ, сделанной по упомянутой выше продвинутой технологии.

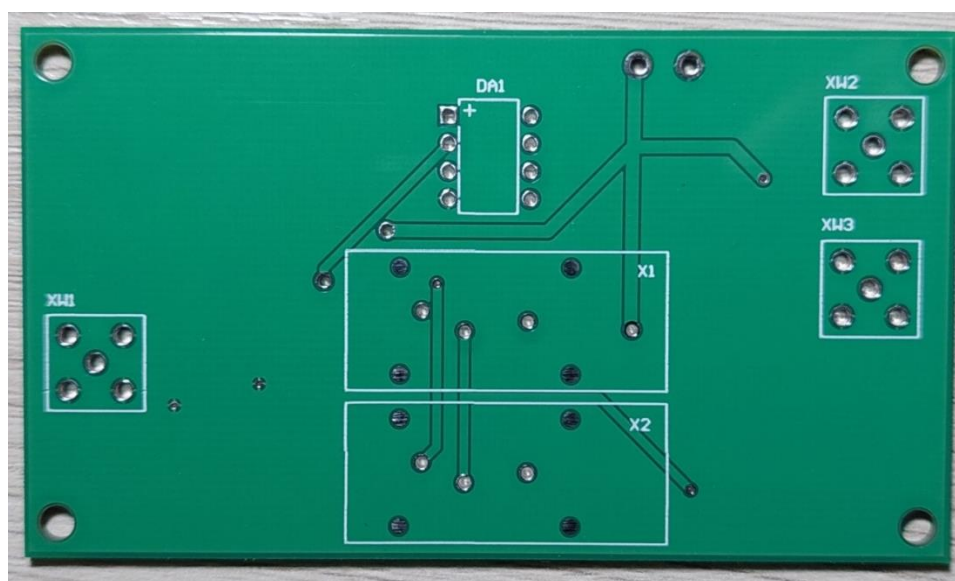


Рисунок 4. Печатная плата КУ (слой Top-Layer)

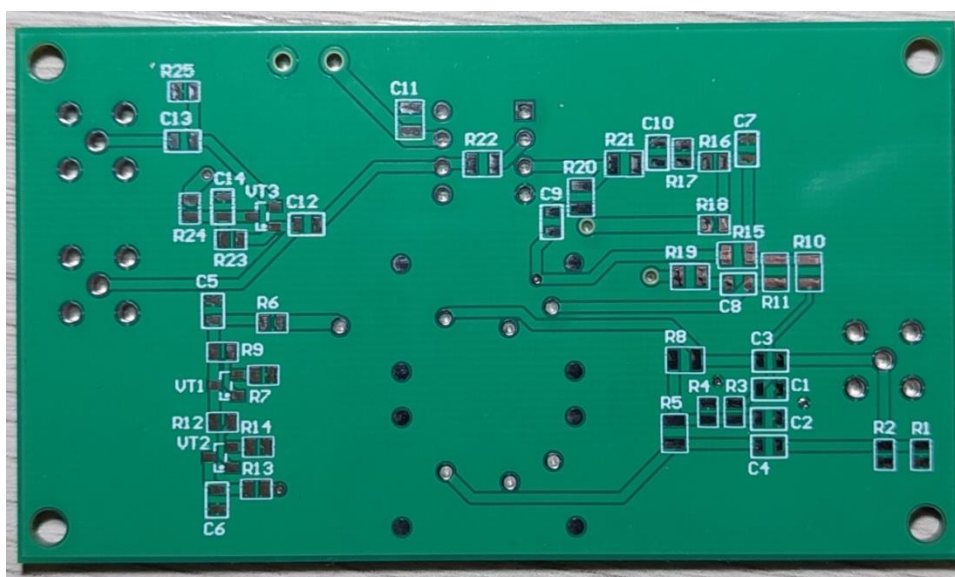


Рисунок 5. Печатная плата КУ (слой Bottom-Layer)

Как можно видеть из данных рисунков печатные платы совпадают со сделанной ранее топологией.

Заключение

В ходе выполнения данной работы была спроектирована печатная плата устройства для контроля электрических параметров серийно-выпускаемых транзисторов. В целом поставленные цели и задачи можно считать выполненными, полученная печатная плата может быть использована для тестирования электрических параметров транзисторов.

Список литературы

1. Сергеева М. Д., Кузьмина С. В., Борисов Г. М. Анализ систем автоматизированного проектирования печатных плат // Технологии инженерных и информационных систем. 2021. 1. 59-71.
2. Андреев В. В., Куропатова Л. С. Исследование и оптимизация печатной платы для испытательного стенда // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2021. 1 (32). 87-96.
3. Лопаткин А. Проектирование печатных плат в системе Altium Designer: учебное пособие. 2-е изд. Москва: ДМК Пресс, 2017. 554 с.
4. Utekhina N., Solomatin A. Adaptation of the electronic device design route using Russian software // Journal of Physics: Conference Series. 1680. 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012053
5. Исаев В. В., Зимин А. А. Разработка системы анализа Gerber файлов для оценки качества трассировки печатных плат // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов. Москва, 21–25 ноября 2022 года. Москва: Издательство Перо, 2022. С. 79.
6. Боброва Ю., Смирнова О., Мануков Д. Обзор технологических возможностей трехмерной печати в производстве печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2019. 7(115). 38-45.
7. Асатулова Е. С., Ермилова Ю. С. Типы и особенности проектирования печатных плат // Интернаука. 2019. 47-1(129). 67-69.
8. Потапов Н. С. Изготовление двусторонних печатных плат с применением фрезерного станка с числовым программным управлением // Наука и образование – 2021: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 01 декабря 2021 года. Мурманск: Мурманский государственный технический университет 2022. С. 63-67.
9. Ланин В. Л., Емельянов В. А., Петухов И. Б. Технология и оборудование сборки и монтажа электронных средств. Минск: Белорусская наука, 2022. 512 с.
10. Вакс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. Москва: Техносфера, 2013. 696 с.

References

1. Sergeeva M. D., Kuzmina S. V., Borisov G. M. Analiz sistem avtomatizirovannogo proyektirovaniya pechatnykh plat [The choice of CAD for PCB design] // Technologies of engineering and information systems. 2021. 1. 59-71.
2. Andreev V. V., Kuropatova L. S. Issledovaniye i optimizatsiya pechatnoy platy dlya ispyatel'nogo stenda [Research and optimization of the printed circuit board for the test bench] // Electronic journal: science, technology and education. 2021. 1 (32). 87-96.
3. Lopatkin A. Proyektirovaniye pechatnykh plat v sisteme Altium Designer: uchebnoye posobiye [Designing printed circuit boards in the Altium Designer system: study guide]. 2nd edition. Moscow: DMK Press, 2017. 554 p.
4. Utekhina N., Solomatin A. Adaptation of the electronic device design route using Russian software // Journal of Physics: Conference Series. 1680. 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012053
5. Isaev V. V., Zimin A. A. Razrabotka sistemy analiza Gerber faylov dlya otsenki kachestva trassirovki pechatnykh plat [Development of a system for analyzing Gerber files to assess the quality of tracing printed circuit boards] // Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics: collection of abstracts of competitive works of XIV All-Russian Cross-Industry Youth Contest of Scientific and Technical Works and Projects, Moscow, November 21-25, 2022. Moscow: Pero Publisher, 2022. P. 79.
6. Bobrova Yu., Smirnova O., Manukov D. Obzor tekhnologicheskikh vozmozhnostey trekhmernoy pechati v proizvodstve pechatnykh plat [Review of the technological capabilities of three-dimensional printing in the production of printed circuit boards] // Technologies in Electronic Industry. – 2019. – No. 7(115). – P. 38-45.
7. Asaturova E. S., Ermilova Yu. S. Tipy i osobennosti proyektirovaniya pechatnykh plat [Types and features of printed circuit board design] // Internauka. 2019. 47-1(129). 67-69.
8. Potapov N. S. Izgotovleniye dvustoronnikh pechatnykh plat s primeneniym frezernogo stanka s chislovyim programmnyim upravleniyem [Manufacturing of double-sided printed circuit boards using a milling machine with numerical control] // Science and Education – 2021: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Murmansk, December 1, 2021. Murmansk: Murmansk State Technical University, 2022. P. 63-67.
9. Lanin V. L., Emelyanov V. A., Petukhov I. B. Tekhnologiya i oborudovaniye sborki i montazha elektronnykh sredstv [Technology and equipment for assembly and installation of electronic equipment]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2022. 512 p.
10. Vaks E. D., Milenky M. N., Saprykin L. G. Praktika pretsizionnoy lazernoy obrabotki [Practice of precision laser processing]. Moscow: Technosphera, 2013. 696 p.

Информация об авторах

Осинний Никита Александрович – инженер-конструктор, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0007-2861-6623, nikita.osinnii@yandex.ru

Петров Дмитрий Александрович – инженер-конструктор I категории, АО «ОКБ Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID:0009-0006-6894-259X, petrovd@okbplaneta.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 536.63

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).31-42

ГРНТИ 29.17.41

Специальность ВАК 2.2.2; 1.3.4

Научная статья

РАСЧЕТ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ

Терехов С. В.

Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)

Аннотация Технология получения сложного оксида опирается на знание его теплофизических характеристик, в частности, теплоемкости. Для расчета ее температурной зависимости использована ранее предложенная термодинамическая модель двухфазной локально-равновесной области. Числовые значения параметров и коэффициентов модели получены из сравнения теоретической кривой с приведенными в литературе экспериментальными данными. Показано, что соотношения построения адекватно описывают экспериментальные массивы различных сложных оксидов не только на исследованных ограниченных интервалах температур, но и позволяют вычислить теплоемкости оксидов в диапазоне от 0 К до их температуры плавления. Указано на необходимость дополнительного экспериментального исследования превращения в ортониобате неодима в районе 1000 К.

Ключевые слова: *термодинамическая модель, локальный уровень, параметр порядка, температура, полиморфные превращения, фазовые переходы*

Для цитирования: Терехов С. В. Расчет теплоемкостей сложных оксидов // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 31-42. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).31-42

Research Article

CALCULATION OF THE HEAT CAPACITIES OF COMPLEX OXIDES

Terekhov S. V.

Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering (Donetsk, Russia)

Abstract The technology for producing a complex oxide is based on knowledge of its thermophysical characteristics, in particular, heat capacity. To calculate its temperature dependence, a previously proposed thermodynamic model of a two-phase local equilibrium region was used. The numerical values of the parameters and coefficients of the model are obtained from a comparison of the theoretical curve with the experimental data given in the literature. It is shown that the construction relations adequately describe experimental arrays of various complex oxides not only in the limited temperature ranges studied, but also make it possible to calculate the heat capacities of oxides in the range from 0 K to their melting point. The need for additional experimental study of the transformation in neodymium orthoniobate in the region of 1000 K is indicated.

Keywords: *thermodynamic model, local level, order parameter, temperature, polymorphic transformations, phase transitions*

For citation: Terekhov S. V. Calculation of the heat capacities of complex oxides // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 31-42. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).31-42

Введение

Современные исследования тепловых свойств сложных оксидов [1-20] определяются техническими применениями этих неорганических материалов

(перовскитов, спинелей, германатов и других). Например, перовскиты применяют как ферро- и пьезоэлектрические материалы; спинели – при разработке элементов оптических систем и катализаторов. Другие сложные оксиды используют при изготовлении СВЧ-диэлектриков, электродов топливных элементов, мембран газового разделения, термобарьеров, фильтров для очистки воды, пигментов, сенсоров, керамики и другой промышленной продукции. Разработка новых составов сложных оксидов с заданными теплофизическими свойствами и технологий их синтеза требует знания термодинамических характеристик, в частности, теплоемкостей.

При экспериментальном исследовании температурной зависимости теплоемкости сложного оксида на вид кривой оказывают влияние большое число факторов: от предварительной подготовки образца до тепловых эффектов, связанных с протеканием в течение измерений разнообразных кинетических процессов в его подсистемах (электронной, атомарной, вакансионной, фононной, магнетонной и др.). Они могут приводить к структурным перестройкам (на кривой теплоемкости отображаются в виде конечных скачков), образованию новых фаз (округлые пики и ямы отвечают фазовым переходам I рода; острые пики и ямы – фазовым переходам II рода) или полиморфным превращениям (последовательное чередование пика и ямы или наоборот). Отсутствие аномалий на температурной зависимости теплоемкости указывает на несущественный вклад отмеченных явлений.

Измерение теплоемкости проводится по двум различным методикам в низко- (от 0 до 350 К) и высокотемпературном (свыше 350 К) диапазонах. В этой связи возникает необходимость в объединении полученных результатов. В научной литературе много работ посвящено измерениям теплоемкостей сложных оксидов в высокотемпературной области [3, 5, 6, 8, 11-16] и мало – исследованиям в низкотемпературной области [1, 2] или в обоих диапазонах температур [4, 7, 9, 10]. Поведение температурной зависимости теплоемкости в экспериментально неисследованных интервалах можно восстановить в рамках теоретической модели [21], как это было продемонстрировано в работах [22, 23]. В отличие от часто используемых методов аппроксимации экспериментальных данных [24, 25] в рамках модели [21] удастся восстановить температурную зависимость теплоемкости от 0 К до температуры плавления исследуемого вещества. Поэтому расчет теплоемкостей сложных оксидов в диапазоне температур от 0 до 1500 К, экспериментально исследованных в [1, 3-16], является целью данной работы.

Модель двухфазной локально-равновесной области

Образец сложного оксида представляет собой неравновесную систему. Для моделирования ее состояния в [21] были приняты следующие гипотезы:

- система разбивается на совокупность локальных областей;

- размер области и время ее перехода в термодинамическое равновесие с ближайшим окружением (локальный уровень вещества) значительно меньше любого линейного размера образца и времени достижения теплового равновесия системы в целом (субстанциональный уровень вещества);
- характеристические функции плавно изменяются при переходе от одной локальной области к другой;
- в каждой локальной области сосуществуют две идеальные фазы с разными степенями порядка.

Такой подход обеспечивает зависимость термодинамических потенциалов не только от интенсивных параметров (давления P и температуры T), но и пространственных r и временных t координат.

Обозначим через $x_1 = x$ и $x_2 = 1 - x$ объемные доли фаз 1 и 2, соответственно. Тогда химические потенциалы $\mu_i(P, T, r, t)$ ($i = 1, 2$) идеальных фаз равны

$$\mu_i(P, T, r, t) = \mu_{i0}(P, T, r, t) + k_B T \ln x_i(P, T, r, t), \quad (1)$$

где $\mu_{i0}(P, T, r, t)$ – стандартные значения химических потенциалов для каждой из фаз, k_B – постоянная Больцмана. Формула (1) показывает, что с течением времени локальное термодинамическое равновесие претерпевает изменения в каждой точке системы. В дальнейшем будем считать, что локальные области изотропны, т. е. функции (1) не зависят от пространственного аргумента.

Энергия Гиббса локальной области задается формулой

$$g = \sum_{i=1}^2 \mu_i x_i = \mu_{20} + \Delta\mu \cdot x + k_B T [x \ln x + (1-x) \ln(1-x)] \quad (2)$$

здесь $\Delta\mu = \mu_{10} - \mu_{20}$. Если в качестве параметра порядка выбрать разность объемных долей фаз

$$\eta = x_1 - x_2 = 2x - 1 \quad (3)$$

и провести по нему минимизацию характеристической функции (2), то для фазового состава x получим температурную зависимость

$$x = [1 - \text{th}(\varphi/T)]/2 \quad (4)$$

Разложив величину $\varphi = \Delta\mu/(2k_B)$ в ряд Тейлора в окрестности температуры равных составов фаз T_x и сохранив только линейный член ряда, получим

$$\varphi = a[(T_x/T) - 1] \quad (5)$$

где $a = -\partial\varphi/\partial T$ – параметр модели.

Локальные характеристики термодинамического состояния в выбранной точке и ее малой окрестности определяются частными производными от (2)

по интенсивным аргументам при фиксированном фазовом составе x . Полученные таким образом температурные зависимости будем называть базисными. Субстанциональные свойства системы в целом задаются полными производными от (2), так как они учитывают изменение объемных долей фаз при переходе от точки к точке.

Поэтому локальная энтропия системы вычисляется по классической формуле [26]

$$S_b = -\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_x = -\frac{\partial \mu_{20}}{\partial T} - \frac{\partial(\Delta\mu)}{\partial T} \cdot x - k_B [x \ln x + (1-x) \ln(1-x)] = S_1 + S_2 \cdot x + S_3 \quad (6)$$

где $S_1 = -\partial \mu_{20} / \partial T$, $S_2 = -\partial(\Delta\mu) / \partial T$, $S_3 = -k_B [x \ln x + (1-x) \ln(1-x)]$. Следовательно, базисная линия теплоемкости системы описывается уравнением

$$C_b = T(\partial S_b / \partial T)_x = T(\partial S_1 / \partial T)_x + T(\partial S_2 / \partial T)_x \cdot x = k_1 T + k_2 x \quad (7)$$

с коэффициентами $k_1 = T(\partial S_1 / \partial T)_x$, $k_2 = T(\partial S_2 / \partial T)_x$. Формулу (7) можно интерпретировать как разложение локальной теплоемкости в ряд Маклорена по температуре и фазовому составу с сохранением линейных членов ряда. Слагаемые в (7) описывают вклады в теплоемкость электронно- и атомарноподобных подсистем, соответственно. При вычислении базисной теплоемкости (7) коэффициенты k_1 и k_2 будем считать постоянными величинами. Отметим, что выражение типа второго слагаемого в (7) при больших значениях параметра a для какой-либо из подсистем описывает скачок базисной линии. Эта аномалия связана с протеканием в подсистеме структурного перехода.

Субстанциональная энтропия системы вычисляется с использованием полной производной от (2) по температуре при изменяющемся фазовом составе x

$$S = -(dg / dT) = -[(\partial g / \partial T)_x - (\partial g / \partial x)_T \partial(dx / dT)] = S_b + \varepsilon_T u \quad (8)$$

где энергия сосуществования фаз

$$\varepsilon_T = -(\partial g / \partial x)_T = -\Delta\mu - k_B T \ln[x / (1-x)] \quad (9)$$

$u = dx / dT$ – «скорость» изменения фазового состава x при тепловом переходе в новое состояние. Локальная энтропия (6) совпадает с ее субстанциональным определением (8) при достижении локального равновесия, т. е. при выполнении равенства $\varepsilon_T = 0$, которое порождает формулу (4). Таким образом, второе слагаемое в (8) связано с процессами, обеспечивающими переход локальной области в термодинамическое равновесие с ближайшим окружением.

Субстанциональная теплоемкость

$$C = TdS_b/dT = T[(\partial S/\partial T)_{x,u} + (\partial S/\partial x)_{T,u}(dx/dT) + (\partial S/\partial u)_{T,x}(du/dT)] = C_b + C_c + C_d \quad (10)$$

Наличие в формуле (10) второго и третьего слагаемого указывает на то, что кинетика формирования локального равновесия влияет на величину субстанциональной теплоемкости. Второе слагаемое в (10)

$$C_c = \{2\xi_T - Tu/[x(1-x)]\}Tu = k_3Tu \quad (11)$$

($\xi_T = (\partial \varepsilon_T / \partial T)_{x,u}$, $k_3 = 2\xi_T - Tu/[x(1-x)]$) при постоянном коэффициенте k_3 описывает на температурной зависимости теплоемкости особенности в виде пиков ($k_3 > 0$) и ям ($k_3 < 0$). Они формируются в результате протекания в подсистемах фазовых переходов и полиморфных превращений. Фазовым переходам I рода соответствуют широкие округлые пики и ямы (например, переходы кристалл-жидкость), полиморфным превращениям – их чередование, а фазовым переходам II рода – узкие острые пики и ямы (например, магнитные переходы). Вершины особенностей отвечают температурам фазовых переходов. Третье слагаемое в (10)

$$C_d = T\varepsilon_T w \quad (12)$$

($w = du/dT$) при достижении локального равновесия ($\varepsilon_T = 0$) обращается в нуль.

Таким образом, теплоемкость образца сложного оксида при достижении им локально-равновесного состояния можно вычислить по формуле

$$C = C_b + C_c \quad (13)$$

В формуле (13) локальный уровень организации вещества представлен первым слагаемым, ответственным за формирование базисной линии, а субстанциональный уровень – вторым слагаемым, связанным с реализацией в системе и ее подсистемах фазовых переходов и полиморфных превращений.

Обсуждение результатов

В таблице 1 приведены параметры и коэффициенты теоретической модели для расчета температурных зависимостей теплоемкостей сложных оксидов из работ [1, 3-16] и для сравнения приведены постоянные модели для оксидов из [22, 23].

Для сложных оксидов с германием параметр a изменяется в пределах от 0.23 до 0.49. Вне этого диапазона, в частности, располагаются сложные оксиды $Nd_2Ge_2O_7$, $Er_2Ge_2O_7$, $FeTa_2O_6$ [22], $EuGaTi_2O_7$, $DyGaTi_2O_7$ [23] и $LaGa_{0.5}Sb_{1.5}O_6$, при этом параметр a превышает 0.5. Значения параметра T_x принадлежат интервалу от 123 K ($EuBiGeO_5$) до 718 K ($Cu_5V_2O_{10}$ [22]).

Таблица 1. Параметры и коэффициенты теоретической модели для вычисления теплоемкостей сложных оксидов

Вещество	a	T_x , К	k_1 , мДж/(моль·К ²)	k_2 , Дж/(моль·К)
La ₂ Hf ₂ O ₇	0.43	193	183	287
Cu ₅ V ₂ O ₁₀ [22]	0.33	341	1.5	718
Pr ₂ Sn ₂ O ₇	0.321	308	33.4	450
NdNbO ₄ *	0.351	256	32.5	216
Nd ₂ Ge ₂ O ₇ [22]	0.557	137	27.1	362
In ₂ Ge ₂ O ₇ [23]	0.23	456	4	466
Er ₂ Ge ₂ O ₇ [22]	0.647	166	31.8	333
FeTa ₂ O ₆ [22]	0.671	187	17	276
ErBiGeO ₅ [23]	0.49	219	12	288
EuBiGeO ₅	0.44	123	25	284
HoBiGeO ₅ [23]	0.41	195	50	269
NdGaGe ₂ O ₇	0.24	428	15.8	459
DyInGe ₂ O ₇	0.29	289	1.2	438
HoInGe ₂ O ₇	0.31	266	11.3	410
GdFeGe ₂ O ₇	0.29	376	19.2	438
InFeGe ₂ O ₇	0.28	334	4	438
YInGe ₂ O ₇ [23]	0.30	322	17.2	414
DyGaTi ₂ O ₇ [23]	0.70	183	17	348
EuGaTi ₂ O ₇ [23]	0.67	204	29	352
GdGaTi ₂ O ₇ [22]	0.672	214	2.07	372
SmGaGe ₂ O ₇ [22]	0.688	220	31.22	338
LaGa _{0.5} Sb _{1.5} O ₆	0.84	153	53.3	228

*яма: $a_1 = 9$, $T_{x1} = 1089$ К, $k_{31} = -3.3$ Дж/(моль·К²).

Разброс более, чем 600 К, по-видимому, обусловлен разными условиями формирования состояний с равными составами фаз. Для выбранной температуры T_x бóльшим значениям параметра a будет соответствовать более узкий температурный интервал превращения фазы с малым a в фазу с бóльшим значением параметра порядка (3). Различия в значениях коэффициентов k_1 , k_2 указывает на отличия свойств электронно- и атомарноподобных подсистем, соответственно. Чем выше эти значения, тем бóльший вклад в теплоемкость системы дает соответствующая подсистема.

На рисунке 1а показана аппроксимация теоретической кривой экспериментальных данных для La₂Hf₂O₇ [1] в низкотемпературной области, а на рисунке 1б – приближение теоретической линией данных работ [4, 9, 10] в интервале температур от 0 до 1500 К.

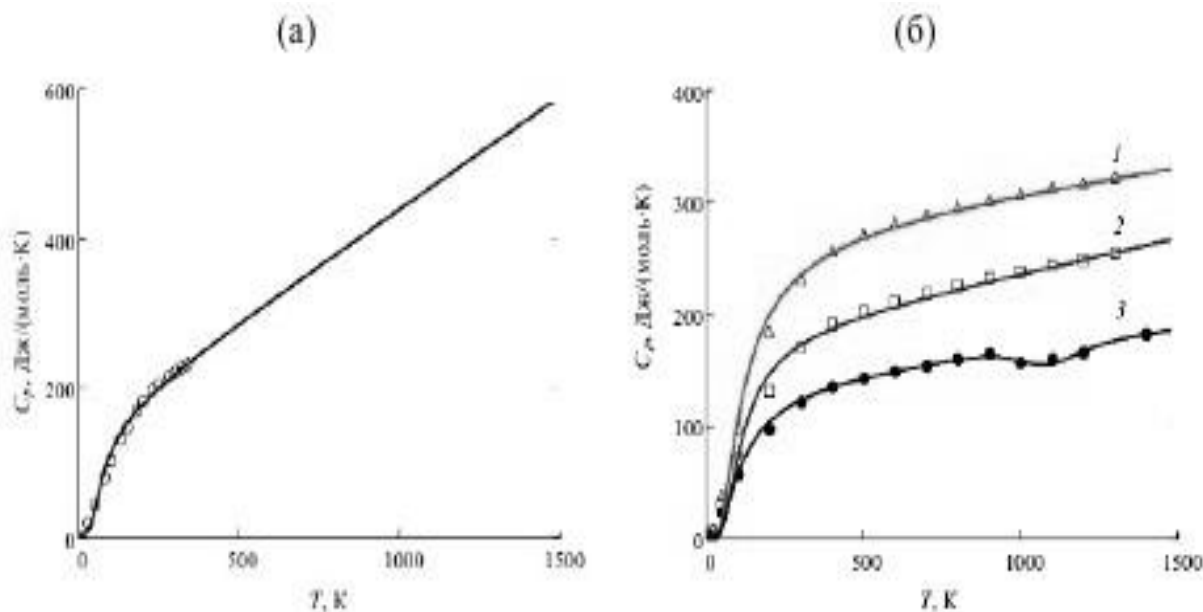


Рисунок 1. Температурное поведение теплоемкостей сложных оксидов: (а) – $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$; (б) – $\text{Pr}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ (1), $\text{LaGa}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ (2), NdNbO_4 (3) (светлые кружки – данные [1], треугольники – [9], квадраты – [4], черные кружки – [10]; сплошная линия – теория)

Из рисунка 1б видно, что на кривой теплоемкости NdNbO_4 (3) наблюдается яма с минимумом при температуре 1089 К. Вблизи этой температуры в работе [27] отмечено наличие моноклинно-тетрагонального полиморфного превращения II рода, а в работе [28] – указано на реализацию перехода от сегнетоэластичного к параупругому состоянию. На рисунке 2 отображены теоретические температурные зависимости теплоемкостей сложных оксидов, содержащих германий, и экспериментальные данные [3, 5, 6, 8] в высокотемпературной области. Рисунок 2 демонстрирует монотонный рост теплоемкостей в интервале температур более 350 К.

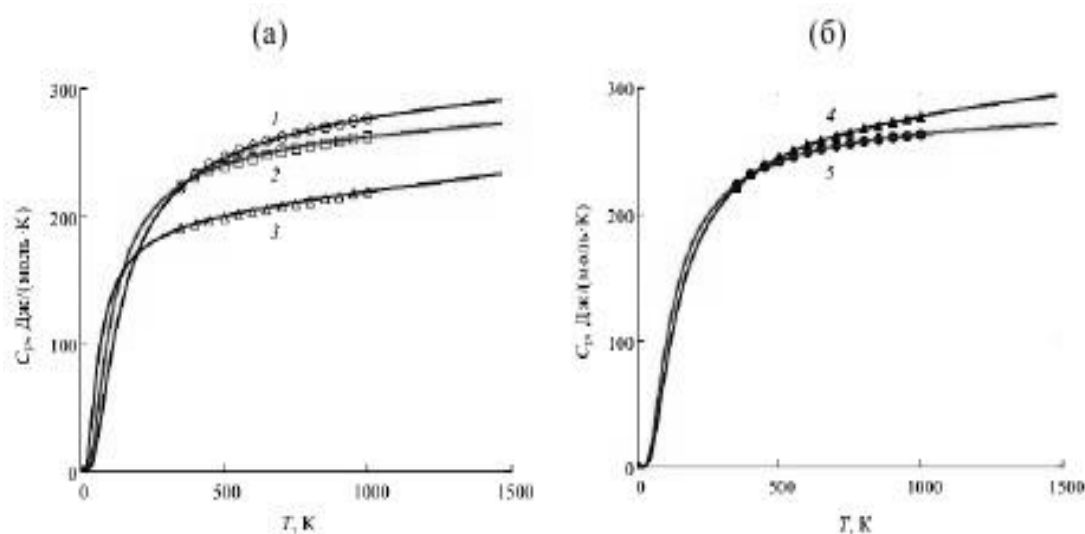


Рисунок 2. Высокотемпературные зависимости теплоемкостей сложных оксидов: (а) – $\text{NdGaGe}_2\text{O}_7$ (1), $\text{HoInGe}_2\text{O}_7$ (2), EuBiGeO_5 (3); (б) – $\text{GdFeGe}_2\text{O}_7$ (4), $\text{InFeGe}_2\text{O}_7$ (5) (светлые кружки – данные [6], квадраты – [3], треугольники – [5], черные треугольники и кружки – [8]; сплошная линия – теория)

Рисунки 1 и 2 показывают достаточную адекватность использованной теоретической модели массивам экспериментальных результатов. Модель позволяет оценить поведение кривой теплоемкости сложного оксида на экспериментально неисследованных интервалах температур. При использовании различающихся методик и аппаратуры измерения в низко- и высокотемпературных диапазонах особо важным фактором является сшивание непрерывной кривой экспериментальных массивов данных в указанных областях.

Заключение

Предлагаемая модель показала применимость полученных простых соотношений для описания зависимостей теплоемкостей разнообразных сложных оксидов от температуры. Расчетные формулы модели использованы как при отсутствии структурных, полиморфных и фазовых переходов, так и при наличии в ортониобате неодима превращения (или перехода), физическая природа которого требует дополнительного экспериментального исследования. Существенным преимуществом данного подхода является возможность интерполяции и экстраполяции теоретических кривых на экспериментально неисследованные интервалы температур вплоть до температуры плавления вещества. Наличие баз данных по параметрам модели позволит в силу простоты используемых функций уменьшить временные затраты на разработку технологий получения сложных оксидов с заранее заданными тепловыми характеристиками.

Список литературы

1. Гуськов В. Н., Гагарин П. Г., Гуськов А. В., Тюрин А. В., Гавричев К. С. Низкотемпературная теплоемкость гафната лантана // Журнал неорганической химии. 2019. 64(11). 1210-1214. DOI: 10.1134/S0044457X19110060
2. Kopan A. R., Gorbachuk M. P., Lakiza S. M., Tichenko Y. S. Calorimetric study of the $\text{La}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ heat capacity in the range 57–302 K // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2016. 54(11-12). 696-703. DOI: 10.1007/s11106-016-9764-5
3. Денисова Л. Т., Иртюго Л. А., Каргин Ю. Ф., Белецкий В. В., Белоусова И. В., Денисов В. М. Теплоемкость и термодинамические функции германатов $\text{DyInGe}_2\text{O}_7$ и $\text{HoInGe}_2\text{O}_7$ в области 350–1000 К // Журнал неорганической химии. 2019. 64(9). 980-983. DOI: 10.1134/S0044457X19090071
4. Егорышева А. В., Голодухина С. В., Тюрин А. В., Хорошилов А. В., Веселов В. О., Светогоров Р. Д. Синтез, структура и термические свойства сложных оксидов $\text{LnGa}_0.5\text{Sb}_{1.5}\text{O}_6$ со структурой типа розаита // Журнал неорганической химии. 2019. 64(9). 901-908. DOI: 10.1134/S0044457X19090101
5. Денисова Л. Т., Каргин Ю. Ф., Галиахметова Н. А., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Синтез и исследование высокотемпературной теплоемкости EuBiGeO_5 // Журнал неорганической химии. 2020. 65(1). 3-7. DOI: 10.31857/S0044457X20010067
6. Денисова Л. Т., Каргин Ю. Ф., Иртюго Л. А., Белецкий В. В., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Синтез, структура и теплофизические свойства

германата $\text{NdGaGe}_2\text{O}_7$ // Журнал неорганической химии. 2020. 65(5). 581-585. DOI: 10.31857/S0044457X20050074

7. Никифорова Г. Е., Тюрин А. В., Рюмин М. А., Брюханова К. И., Хорошилов А. В., Гавричев К. С. Теплоемкость и термодинамические функции ортониобата диспрозия в интервале 2–1300 К // Журнал неорганической химии. 2020. 65(5). 643-650. DOI: 0.31857/S0044457X20050189

8. Денисова Л. Т., Иртюго Л. А., Каргин Ю. Ф., Белецкий В. В., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Синтез и высокотемпературные термодинамические свойства $\text{InFeGe}_2\text{O}_7$ и GdFeGe_2O // Журнал неорганической химии. 2020. 65(7). 867-871. DOI: 10.31857/S0044457X20070041

9. Тюрин А. В., Хорошилов А. В., Рюмин М. А., Гуськов В. Н., Гуськов А. В., Гагарин Н. Г., Никифорова Г. Е., Конратьева О. Н., Печковская К. И., Ефимов Н. Н., Гуревич М. В., Гавричев К. С. Термодинамические и магнитные свойства станната празеодима // Журнал неорганической химии. 2020. 65(12). 1668-1675. DOI: 10.31857/S0044457X2012020X

10. Никифорова Г. Е., Кондратьева О. Н., Тюрин А. В., Рюмин М. А., Хорошилов А. В., Гавричев К. С. Теплоемкость и термодинамические функции ортониобата неодима // Журнал неорганической химии. 2021. 66(2). 242-249. DOI: 10.31857/S0044457X21020148

11. Денисова Л. Т., Каргин Ю. Ф., Белоусова Н. В., Галиахметова Н. А., Денисов В. М. Высокотемпературная теплоемкость и термодинамические свойства HoBiGeO_5 и ErBiGeO_5 // Неорганические материалы. 2018. 54(9). 972-976. DOI: 10.1134/S0002337X18090026

12. Денисова Л. Т., Каргин Ю. Ф., Иртюго Л. А., Белоусова Н. В., Белецкий В. В., Денисов В. М. Теплоемкость $\text{In}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ и YInGe_2O_7 в области температур 320–1000 К // Неорганические материалы. 2018. 54(12). 1315-1319. DOI: 10.1134/S0002337X18120023

13. Денисова Л. Т., Молокеев М. С., Каргин Ю. Ф., Рябов В. В., Чумилина Л. Г., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Структура и термодинамические свойства титанатов $\text{DyGaTi}_2\text{O}_7$ и $\text{EuGaTi}_2\text{O}_7$ // Неорганические материалы. 2021. 57(7). 768-775. DOI: 10.31857/S0002337X21070058

14. Денисова Л. Т., Иртюго Л. А., Белецкий В. В., Денисов В. М. Высокотемпературная теплоемкость станнатов $\text{Pr}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ и $\text{Nd}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ // Физика твердого тела. 2016. 58(7). 1259-1262.

15. Денисова Л. Т., Иртюго Л. А., Белецкий В. В., Белоусова Н. В., Денисов В. М. Высокотемпературная теплоемкость германатов $\text{Pr}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ и $\text{Nd}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ в области 350–1000 К // Физика твердого тела. 2018. 60(3). 618-622. DOI: 10.21883/FTT.2018.03.45571.285

16. Гуляева Р. И., Петрова С. А., Чумарев В. М., Мансурова А. Н. Высокотемпературная теплоемкость и термическое расширение FeTa_2O_6 // Физика твердого тела. 2019. 61(10). 1985-1992. DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48281.459

17. Stebbins J. F., Carmichael I. S. E., Moret L. K. Heat capacities and entropies of silicate liquids and glasses // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1984. 86(5). 131-148. DOI: 10.1007/BF00381840

18. Xing X., Qiao Z., Wei S. Thermodynamic properties of complex oxides in the Sm-Ba-Cu-O system // Metallurgical and Materials Transactions B. 1996. 27(12). 973-978. DOI: 10.1007/s11663-996-0011-1

19. Qiu L., White M. A. The constituent additivity method to estimate heat capacities of complex inorganic solids // *Journal of Chemical Education*. 2001. 78(8). 1076-1079. DOI: 10.1021/ed078p1076
20. Rakshit S. K., Parida S. C., Chaudhary Z. S., Venugopal V., Sen B. K., Dach S. Heat capacities of some ternary oxides in the system Ba-Fe-O using differential scanning calorimetry // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. 438(1-2). 279-284. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.08.026
21. Терехов С. В. Термодинамическая модель размытого фазового перехода в металлическом стекле Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆ // *Физика и техника высоких давлений*. 2018. 28(1). 54-61.
22. Терехов С. В. Тепловые свойства вещества в рамках модели двухфазной системы // *Физика твердого тела*. 2022. 64(8). 1077-1083. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52710.352
23. Терехов С. В. Расчет базисной линии теплоемкости вещества в модели двухфазной области при отсутствии фазовых и других переходов // *Неорганические материалы*. 2023. 59(4). 468-472. DOI: 10.31857/S0002337X23040127
24. Морачевский А. Г., Сладков И. Б., Фирсова Е. Г. Термодинамические расчеты в химии и металлургии: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 208 с.
25. Моисеев Г. К., Ватолин Н. А., Маршук Л. А., Ильиных Н. И. Температурные зависимости приведенной энергии Гиббса некоторых неорганических веществ: альтернативный банк данных АСТРА. OWN. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 230 с.
26. Кубо Р. Термодинамика. Москва: Мир, 1970. 304 с.
27. Филатов С. К. Обобщенная концепция повышения симметрии кристаллов с ростом температуры // *Кристаллография*. 2011. 56(6). 1019-1028.
28. Catchen G. L., Williams I. D., Spaar D. M., Wukitch S. J., Adams J. M. Highly asymmetric electric-field gradients at the Nb sites in ferroelastic GdNbO₄ and NdNbO₄ // *Physical Review*. 1991. B 43(1). 1138-1141. DOI: 10.1103/PhysRevB.43.1138

References

1. Guskov V. N., Gagarin P. G., Guskov A. V., Tyurin A. V., Gavrichiev K. S. Low-temperature heat capacity of lanthanum hafnate // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2019. 64(11). 1210-1214. DOI: 10.1134/S0044457X19110060
2. Kopan A. R., Gorbachuk M. P., Lakiza S. M., Tichenko Y. S. Calorimetric study of the La₂Hf₂O₇ heat capacity in the range 57–302 K // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. 54(11-12). 696-703. DOI: 10.1007/s11106-016-9764-5
3. Denisova L. T., Irtyugo L. A., Kargin Yu. F., Beletsky V. V., Belousova I. V., Denisov V. M. Heat capacity and thermodynamic functions of DyInGe₂O₇ and HoInGe₂O₇ germanates in the region of 350-1000 K // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2019. 64(9). 980-983. DOI: 10.1134/S0044457X19090071
4. Egorysheva A. V., Golodukhina S. V., Tyurin A. V., Khoroshilov A. V., Veselov V. O., Svetogorov R. D. Synthesis, structure and thermal properties of complex LnGa_{0.5}Sb_{1.5}O₆ oxides with a rosielite type structure // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2019. 64(9). 901-908. DOI: 10.1134/S0044457X19090101
5. Denisova L. T., Kargin Yu. F., Galiakhmetova N. A., Belousova N. V., Denisov V. M. Synthesis and investigation of the high-temperature heat capacity of EuBiGeO₅ // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2020. 65(1). 3-7. DOI: 10.31857/S0044457X20010067

6. Denisova L. T., Kargin Yu. F., Irtyugo L. A., Beletsky V. V., Belousova N. V., Denisov V. M. Synthesis, structure and thermophysical properties of NdGaGe₂O₇ germanate // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2020. 65(5). 581-585. DOI: 10.31857/S0044457X20050074
7. Nikiforova G. E., Tyurin A. V., Ryumin M. A., Bryukhanova K. I., Khoroshilov A. V., Gavrichiev K. S. Heat capacity and thermodynamic functions of dysprosium orthoniobate in the range of 2-1300 K // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2020. 65(5). 643-650. DOI: 10.31857/S0044457X20050189
8. Denisova L. T., Irtyugo L. A., Kargin Yu. F., Beletsky V. V., Belousova N. V., Denisov V. M. Synthesis and high-temperature thermodynamic properties of InFeGe₂O₇ and GdFeGe₂O₇ // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2020. 65(7). 867-871. DOI: 10.31857/S0044457X20070041
9. Tyurin A. V., Khoroshilov A. V., Ryumin M. A., Guskov V. N., Guskov A. V., Gagarin N. G., Nikiforova G. E., Konratieva O. N., Pechkovskaya K. I., Efimov N. N., Gurevich M. V., Gavrichiev K. S. Thermodynamic and magnetic properties of praseodymium stannate // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2020. 65(12). 1668-1675. DOI: 10.31857/S0044457X2012020X
10. Nikiforova G. E., Kondratieva O. N., Tyurin A. V., Ryumin M. A., Khoroshilov A. V., Gavrichiev K. S. Heat capacity and thermodynamic functions of neodymium orthoniobate // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2021. 66(2). 242-249. DOI: 10.31857/S0044457X21020148
11. Denisova L. T., Kargin Yu. F., Belousova N. V., Galiakhmetova N. A., Denisov V. M. High-temperature heat capacity and thermodynamic properties of HoBiGeO₅ and ErBiGeO₅ // *Inorganic materials*. 2018. 54(9). 972-976. DOI: 10.1134/S0002337X18090026
12. Denisova L. T., Kargin Yu. F., Irtyugo L. A., Belousova N. V., Beletsky V. V., Denisov V. M. The heat capacity of In₂Ge₂O₇ and YInGe₂O₇ in the temperature range 320-1000 K // *Inorganic materials*. 2018. 54(12). 1315-1319. DOI: 10.1134/S0002337X18120023
13. Denisova L. T., Molokeev M. S., Kargin Yu. F., Ryabov V. V., Chumilina L. G., Belousova N. V., Denisov V. M. Structure and thermodynamic properties of DyGaTi₂O₇ and EuGaTi₂O₇ titanates // *Inorganic Materials*. 2021. 57(7). 768-775. DOI: 10.31857/S0002337X21070058
14. Denisova L. T., Irtyugo L. A., Beletsky V. V., Denisov V. M. High-temperature heat capacity of Pr₂Sn₂O₇ and Nd₂Sn₂O₇ stannates // *Solid State Physics*. 2016. 58(7). 1259-1262.
15. Denisova L. T., Irtyugo L. A., Beletsky V. V., Belousova N. V., Denisov V. M. High-temperature heat capacity of germanates Pr₂Ge₂O₇ and Nd₂Ge₂O₇ in the region of 350-1000 K // *Solid State Physics*. 2018. 60(3). 618-622. DOI: 10.21883/FTT.2018.03.45571.285
16. Gulyaeva R. I., Petrova S. A., Chumarev V. M., Mansurova A. N. High-temperature heat capacity and thermal expansion of FeTa₂O₆ // *Solid State Physics*. 2019. 61(10). 1985-1992. DOI: 10.21883/FTT.2019.10.48281.459
17. Stebbins J. F., Carmichael I. S. E., Moret L. K. Heat capacities and entropies of silicate liquids and glasses // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. 86(5). 131-148. DOI: 10.1007/BF00381840
18. Xing X., Qiao Z., Wei S. Thermodynamic properties of complex oxides in the Sm-Ba-Cu-O system // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1996. 27(12). 973-978. DOI: 10.1007/s11663-996-0011-1

19. Qiu L., White M. A. The constituent additivity method to estimate heat capacities of complex inorganic solids // Journal of Chemical Education. 2001. 78(8). 1076-1079. DOI: 10.1021/ed078p1076
20. Rakshit S. K., Parida S. C., Chaudhary Z. S., Venugopal V., Sen B. K., Dach S. Heat capacities of some ternary oxides in the system Ba-Fe-O using differential scanning calorimetry // Journal of Alloys and Compounds. 2007. 438(1-2). 279-284. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.08.026
21. Terekhov S. V. Thermodynamic model of a blurred phase transition in metallic glass Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆ // Physics and technology of high pressures. 2018. 28(1). 54-61.
22. Terekhov S. V. Thermal properties of matter within the framework of a two-phase system model // Solid State Physics. 2022. 64(8). 1077-1083. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52710.352
23. Terekhov S. V. Calculation of the base line of the heat capacity of a substance in a two-phase region model in the absence of phase and other transitions // Inorganic Materials. 2023. 59(4). 468-472. DOI: 10.31857/S0002337X23040127
24. Morachevsky A. G., Sladkov I. B., Firsova E. G. Thermodynamic calculations in chemistry and metallurgy: a textbook. St. Petersburg: Lan, 2018. 208 p.
25. Moiseev G. K., Vatolin N. A., Marshuk L. A., Ilyinykh N. I. Temperature dependences of the reduced Gibbs energy of some inorganic substances: an alternative АСТРА data bank. OWN. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. 230 p.
26. Kubo R. Thermodynamics. Moscow: Mir, 1970. 304 p.
27. Filatov S. K. Generalized concept of increasing the symmetry of crystals with increasing temperature // Crystallography. 2011. 56(6). 1019-1028.
28. Catchen G. L., Williams I. D., Spaar D. M., Wukitch S. J., Adams J. M. Highly asymmetric electric-field gradients at the Nb sites in ferroelastic GdNbO₄ and NdNbO₄ // Physical Review. 1991. B 43(1). 1138-1141. DOI: 10.1103/PhysRevB.43.1138

Информация об авторе

Терехов Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0003-3037-7258, svlter@yandex.ru

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.397.13:09

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).43-56

ГРНТИ 47.51.39+19.51.45

Специальность ВАК 2.2.13; 1.3.4

Научная статья

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ БУМАЖНОЙ ОСНОВЫ ИСТОРИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ

Гареев В. М.¹, Гареев М. В.¹, Калитов М. А.², Корнышев Н. П.¹, Серебряков Д. А.¹

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

² АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье обсуждаются вопросы телевизионной спектральной визуализации применительно к исследованиям бумажной основы исторических документов, в том числе рукописно книжных памятников. Рассматриваются методы формирования и обработки спектральных изображений. Приводятся некоторые технические характеристики аппаратуры и методика экспериментальных исследований. Обсуждаются результаты экспериментов с использованием спектральных телевизионных систем и программ обработки изображений для определения различий в бумажной основе, использованной при написании текстов в рукописно книжных памятниках. Приводятся сравнительные спектральные характеристики и гистограммы, полученные для исследованных образцов бумаги. Формулируются практические рекомендации по применению телевизионных спектральных систем в случае необходимости проведения экспресс-анализа больших массивов исторических документов, а также в случае необходимости углубленных исследований отдельных образцов документов, представляющих особый интерес.

Ключевые слова: телевизионные спектральные системы, обработка изображений, спектральная селекция

Для цитирования: Гареев В. М., Гареев М. В., Калитов М. А., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Телевизионная спектральная визуализация и обработка изображений в исследованиях бумажной основы исторических документов // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 43-56. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).43-56

Research Article

TELEVISION SPECTRAL VISUALIZATION AND IMAGE PROCESSING IN RESEARCH ON THE PAPER BASIS OF HISTORICAL DOCUMENTS

Gareev V. M.¹, Gareev M. V.¹, Kalitov M. A.², Kornyshev N. P.¹, Serebryakov D. A.¹

¹ Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

² JSC "ELSI" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article discusses the issues of television spectral visualization in relation to the research of the paper basis of historical documents, including handwritten book monuments. Methods of formation and processing of spectral images are considered. Some technical characteristics of the equipment and methods of experimental research are given. The results of experiments using spectral television systems and image processing programs to determine differences in the paper base used in writing texts in handwritten book monuments are discussed. Comparative spectral characteristics and histograms obtained for the studied paper samples are presented. Practical recommendations are formulated for the use of television spectral systems in case of need for rapid analysis of large arrays of historical documents, as well as in case of need for in-depth studies of individual samples of documents of special interest.

Keywords: *television spectral systems, image processing, spectral selection*

For citation: Gareev V. M., Gareev M. V., Kalitov M. A., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Television spectral visualization and image processing in research on the paper basis of historical documents // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 43-56. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).43-56

Введение

Исследование бумажной основы документов, в том числе, древних рукописей и книг позволяет в ряде случаев определить место их происхождения, уточнить датировку, бытование и другие факты, имеющие историческое значение [1-4]. Оптико-электронные методы, в том числе, телевизионная спектральная визуализация находят в настоящее время все большее применение таких исследованиях [5-10]. Условно методы телевизионной спектральной визуализации классифицируют по количеству спектральных каналов (зон регистрации лучистых потоков) [11-16] и разделяют на моно-, мульти- и гиперспектральные методы (таблица 1).

Таблица 1 Методы телевизионной спектральной визуализации и их условная классификация

Методы спектральной визуализации	Число спектральных каналов
Моноспектральные	1
Мультиспектральные	До нескольких десятков (обычно 3-50)
Гиперспектральные	До нескольких сотен (обычно 50-300)

Для практики исследований исторических документов наибольший интерес представляют мульти- и гиперспектральные методы. Наиболее простым (минимальным) вариантом телевизионной мультиспектральной системы для видимого диапазона спектра может являться цветная телевизионная камера, содержащая $k=3$ спектральных канала [13] (рисунок 1).

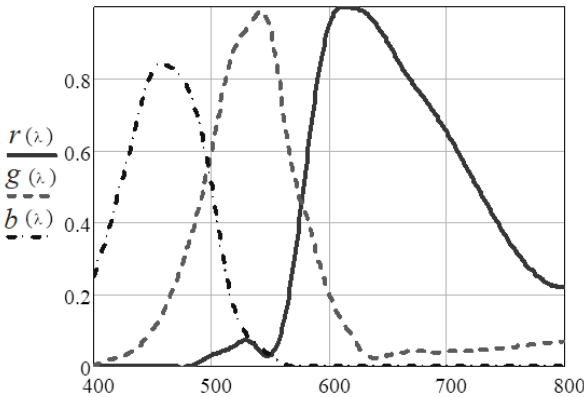


Рисунок 1. Спектральные характеристики rgb каналов цветной телекамеры

В мультиспектральных системах для видимого диапазона спектра и ближнего инфракрасного (до 1100 нм) диапазона спектра с числом спектральных каналов $k>3$ обычно используется черно-белая телевизионная камера с набором узкополосных

интерференционных светофильтров, имеющих полосу пропускания до 10 нм [17] или набором стандартных цветных стекол типа ЖС, ОС, КС, ИКС [18].

Другой вариант получения спектральных каналов предусматривает наличие защиты исследуемого документа от посторонних засветок и его подсветку спектральнональными источниками [19]. В настоящее время в качестве таких источников подсветки используются светодиоды [20], работающие в диапазоне от 365 до 1000 нм (рисунок 2).

Главная задача обработки получаемых спектральных изображений при исследовании бумажной основы документов заключается в построении спектральных характеристик (СХ) для заданных точек или фрагментов изображения, а также спектральных гистограмм (СГ), показывающих количество точек изображения, имеющих одинаковые СХ. Нормировка СГ по количеству элементов изображения даёт нормированную СГ, показывающую вероятность появления в изображении точки с данной СХ. Кроме этого, визуальный анализ документа в отдельных зонах регистрации лучистых потоков может быть дополнен режимом спектральной селекции, при котором на изображении выделяются фрагменты, точки которых имеют одинаковые СХ [20, 21]. Данный вид обработки является более общим случаем цветовой селекции [13], применяемой для *rgb* изображений.

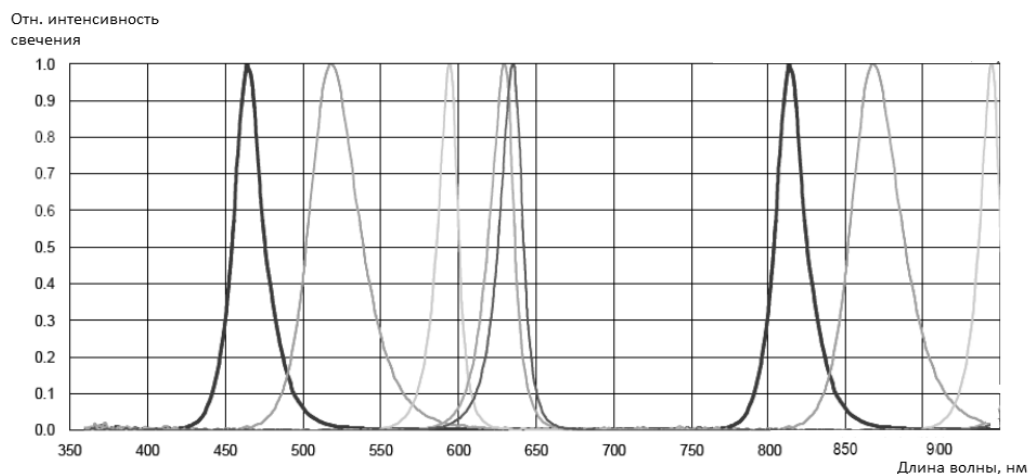


Рисунок 2. Пример спектральных характеристик некоторых светодиодов

В настоящей статье приводятся и анализируются результаты экспериментов по телевизионной спектральной визуализации и компьютерному моделированию методов обработки [22-25] спектральных изображений бумажной основы тестового образца, изготовленного по старинной технологии (ручной отлив), и обычной бумаги, визуально сходной с данным тестовым образцом. Целью экспериментов являлась оценка возможности применения рассмотренных выше методов для исследования бумажной основы документов с точки зрения их эффективности и сложности используемого оборудования, программного обеспечения и требуемых вычислительных ресурсов.

Методика экспериментов

Исследования проводились с использованием мультиспектральной телевизионной системы «Криминалист-2Ц» [26] производства НИИПТ «Растр», Великий Новгород (рисунок 3а), имеющей режим сканирования по 10 спектральным каналам в диапазоне от 375 до 910 нм, реализуемый путем программного управления спектральнональными светодиодными источниками подсветки, а также имеющей режим визуализации *rgb*-изображения при подсветке белыми светодиодами. Кроме этого, для экспериментов была использована гиперспектральная система «FS-23» с прикладным программным обеспечением фирмы FIGSPEC (рисунок 3б) [27].

Компьютерное моделирование методов обработки мультиспектральных изображений осуществлялось в среде MATLAB [23]. При обработке цветного изображения, получаемого при помощи аппаратуры «Криминалист-2Ц» строились спектральные и псевдоспектральные [28] характеристики для $k=3$ спектральных каналов r , g и b . Спектральные характеристики определялись для заданного элемента изображения, а также для исследуемого фрагмента. При этом для исследуемого фрагмента изображения определялась средняя яркость его элементов.

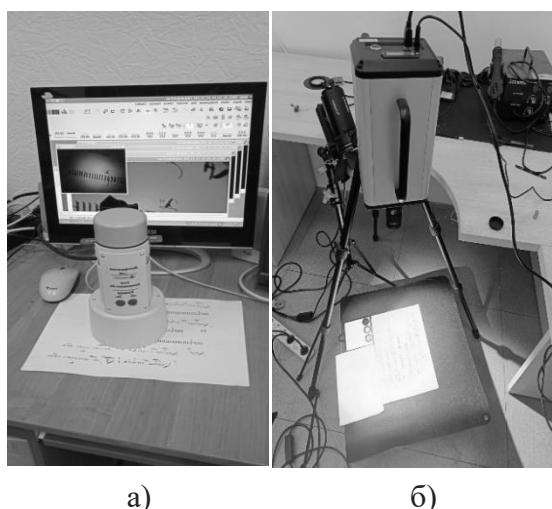


Рисунок 3. Внешний вид аппаратуры: а) «Криминалист 2Ц», б) «FS-23»

Псевдоспектральные характеристики (ПСХ) формировались путем перевода координат цветового пространства *rgb* в цветовое пространство *HSV* [23] с пересчетом параметра цветового тона H из диапазона $[0\ 1]$ в диапазон $[380, 650]$ нм с шагом 10нм. При этом производилась оценка среднего значения сигнала яркости $Y=0,3r+0,59g+0,11b$, а также оценка площади изображения, соответствующего каждой псевдоспектральной составляющей. ПСХ нормировались по отношению к соответствующим максимальным значениям оцениваемого

параметра. Тем самым для *rgb*-изображения формировались истинные СХ $B=f(\lambda)$ и ПСХ типа $B=f(\lambda_n)$ и $S=f(\lambda_n)$, причем, $\lambda_n=f(H)$, где B – яркость изображения, S – площадь изображения, λ и λ_n – длина волны, H – «Hue» (параметр цветового тона).

Построение спектральной гистограммы (СГ) осуществлялось следующим образом. Матрицы спектральных изображений A_i размером $Num=v \times l$ элементов, где $i=1,2,\dots,k$, v – число строк, а l – число столбцов, собирались в стек C размером $v \times l \times k$ при помощи функции *MATLAB* $C=cat(k, A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_k)$, после чего определялись СХ для каждой точки изображения и запоминались в таблице T_1 размером $k \times Num$ элементов. При этом каждая матрица для удобства вычислений преобразовывалась в вектор-строку a_i размером $1 \times Num$. Далее таблица T_1 подвергалась сортировке при помощи функции *MATLAB* $T_2=unique(T_1, 'rows', 'stable')$ с целью исключения повторений СХ, что характерно для подавляющего большинства изображений. В результате сортировки формировалась новая таблица T_2 размером $k \times N$ элементов, где N – число неповторяющихся СХ для данного стека C , причем $N \ll Num$.

На основании данных таблиц T_1 и T_2 производилась разметка элементов изображения в соответствии с порядковым номером СХ $j=1,2,\dots,N$. Для этого осуществлялось сравнение всех столбцов t_{1i} таблицы T_1 с поочередно выбираемыми столбцами t_{2j} таблицы T_2 и проверялось выполнение неравенства $\max(|t_{1i}-t_{2j}|) \leq d$, где $d=0,1,2,\dots,m$ – задаваемое пороговое значение зоны допуска, причем, m – число возможных градаций яркости, равное 256 при 8-ми разрядном кодировании изображений. При выполнении данного неравенства элементы вектора-строки z последовательно заполнялись порядковыми номерами СХ $j=1,2,\dots,N_d$. В случае $d \geq 1$ число $N_d < N$, поскольку для элементов изображения, значения СХ которых не превышают установленное пороговое значение, новый порядковый номер j не присваивается.

Для формирования СГ $h_s=f(N_d)$ в векторе-строке производился подсчет количества элементов, имеющих одинаковые номера $j=1,2,\dots,N_d$. Нормировка СГ осуществлялась путем деления её значений на число элементов изображения Num . Таким образом, в отличие от традиционной гистограммы яркости СГ для разного набора спектральных изображений может отличаться, как своими значениями h_s , так и «длиной» N_d .

Режим спектральной селекции с окрашиванием элементов изображения, имеющих одинаковые СХ, моделировался путем преобразования вектора-строки z в соответствующую матрицу Z при помощи функции *MATLAB* $Z=reshape(z, [v, l])$. Полученная матрица Z индексировалась при помощи функции *MATLAB* $I=grayslice(Z, N_d)$ и цветовой карты $map=colormap(name(N_d))$, где $name$ – вид цветовой карты, и выводилась на экран для просмотра [23].

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов представлены на соответствующих рисунках. Так, на рисунке 4 приведены истинные СХ, а на рисунке 5 показаны ПСХ, построенные для фрагментов изображений исследуемых образцов бумажной основы документа по *rgb* изображению.

Как видно из рисунков 4-6 соответствующие СХ и ПСХ, полученные для исследуемых образцов бумажной основы имеют достаточно существенные отличия. Из колориметрии известно, что каждой длине волны в видимом диапазоне спектра соответствует своё цветовое ощущение, а обратное утверждение о том, что каждому цвету соответствует своя длина волны излучения, строго говоря, неверно [13]. Несмотря на то, что ПСХ строятся на основе указанного выше не вполне корректного обратного утверждения, они, как видно из рисунка 5, могут быть использованы в качестве признаков, характеризующих бумажную основу документа. Сравнивая СХ на рисунке 4 и 6, нетрудно заметить, что увеличение числа спектральных каналов приводит к увеличению количества отличающихся друг от друга точек СХ.

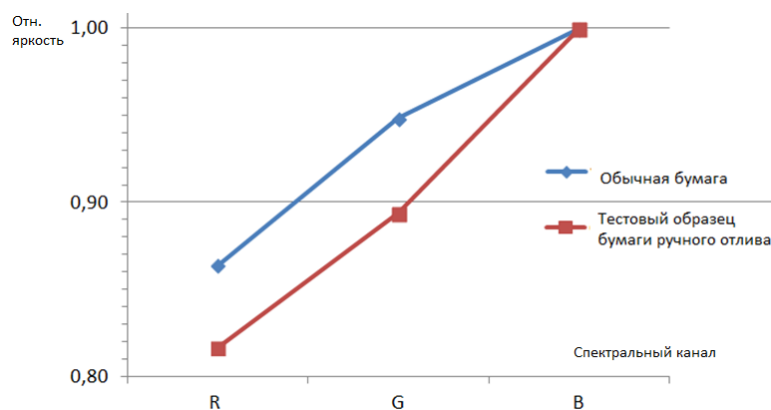


Рисунок 4. СХ для *rgb* фрагментов изображений образцов бумажной основы

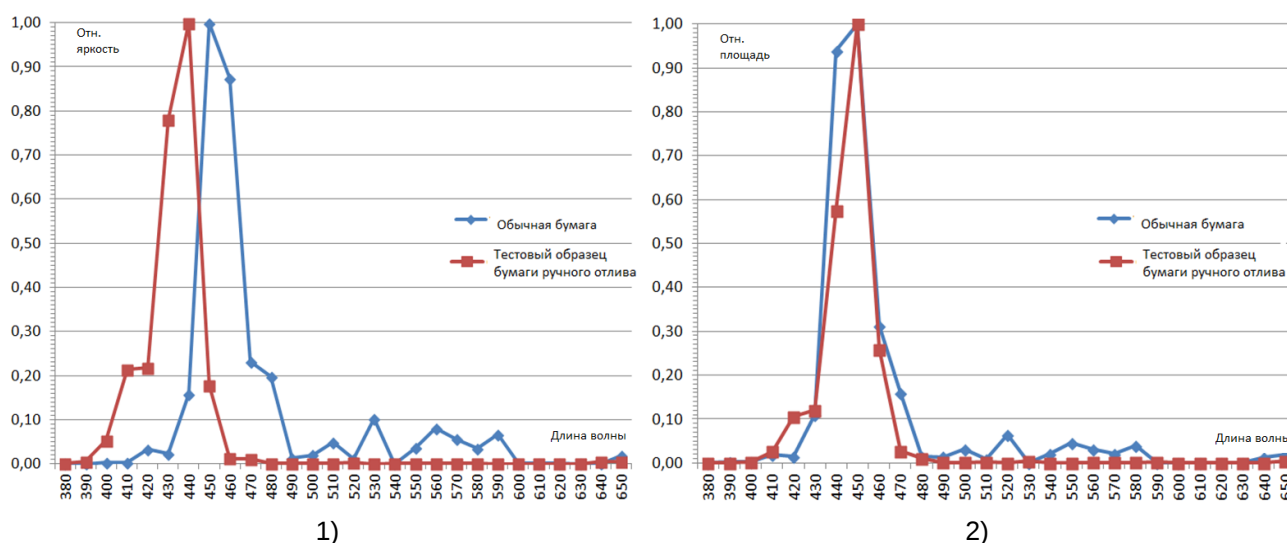


Рисунок 5. ПСХ вида $B=f(\lambda_n) - 1$) и $S=f(\lambda_n) - 2$)

На рисунке 6 приведены СХ для $k=10$ спектральнональных изображений образцов бумажной основы.

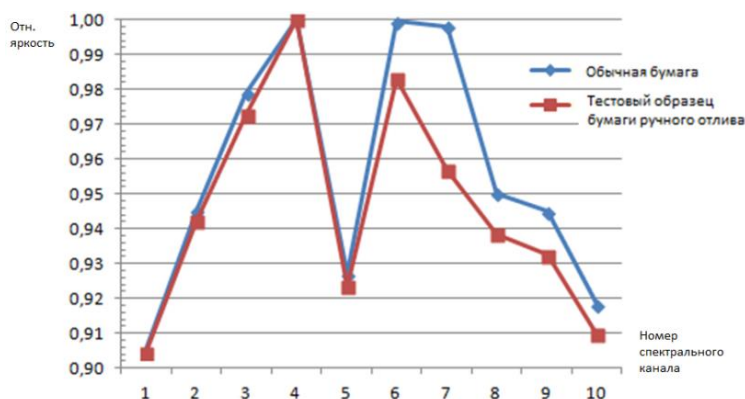


Рисунок 6. СХ для $k=10$ спектральных изображений исследуемых образцов

Теоретически при числе спектральных каналов k и числе градаций яркости m максимально возможное количество СХ равно числу размещений с повторениями $n_{maxmax}=m^k$ [20]. С учетом устанавливаемой зоны допуска $\pm d$ это число уменьшается до $n_{max}=(m/2d)^k$. При этом зону допуска целесообразно устанавливать с учетом априорно задаваемого отношения сигнал-шум $\psi=1,2,\dots$ и величины среднеквадратического отклонения шума в градациях яркости σ , а именно: $d=\psi\sigma$.

В реальных спектральных изображениях из общего числа m градаций яркости обычно представлено их ограниченное количество $m_s < m$. Таким образом, максимально возможное количество СХ сокращается до $n_{s,max}=(m_s/2d)^k$. Однако, из множества максимально возможных СХ, потенциально доступное число СХ ограничивается размером анализируемого изображения $Num=v \times l$. В силу статистических свойств подавляющего большинства исследуемых изображений число СХ $N \ll Num$.

На рисунке 7 приведены СГ для $k=3$ спектральных каналов, построенные по *rgb* изображению тестового образца ручного отлива и образца обычной бумаги при значении зоны допуска $d=2$.

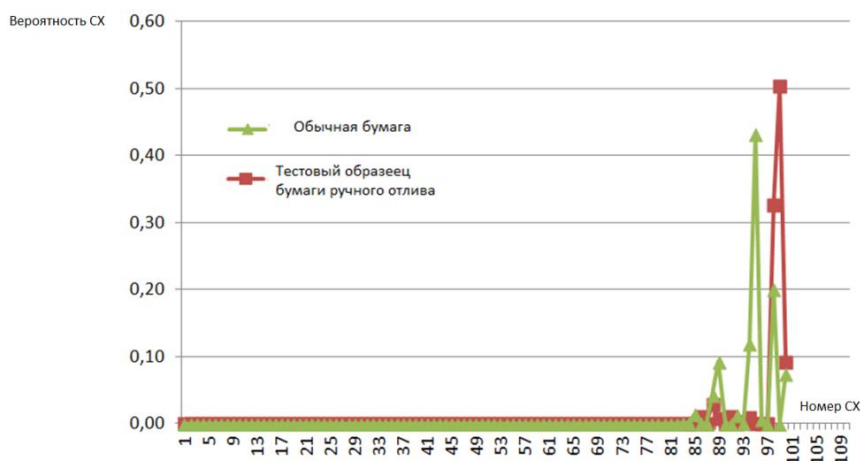


Рисунок 7. СГ для rgb изображений исследуемых образцов ($k=3$)

Как видно из рисунка 7 при $k=3$, число спектральных характеристик для данного стека спектральных изображений достигает значения $N=99$. При увеличении числа спектральных каналов вид СГ изменяется.

На рисунке 8 показаны СГ для $k=10$ спектральных каналов, построенные для данных образцов бумажной основы при значении зоны допуска $d=2$.

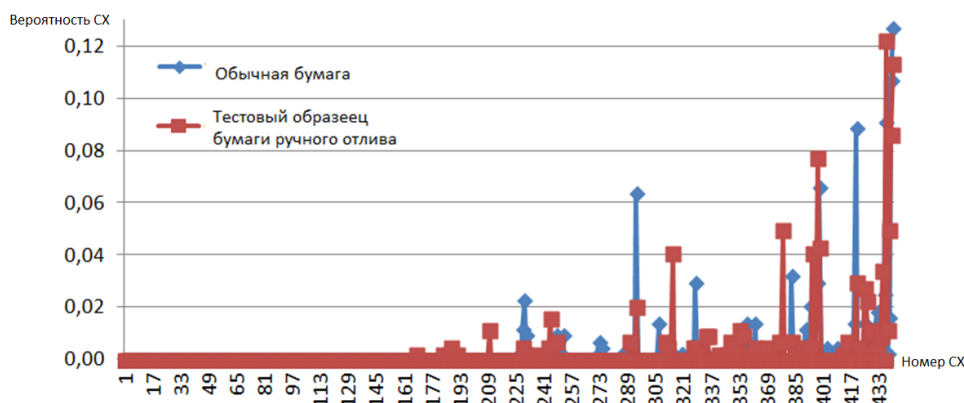


Рисунок 8. СГ для $k=10$ спектральных изображений исследуемых образцов

Как видно из рисунка 8, при $k=10$ число спектральных характеристик для данного стека спектральных изображений увеличивается и достигает значения $N=430$. Сравнение рисунков 7 и 8 показывает, что при увеличении спектральных каналов число отличающихся друг от друга точек в СГ для анализируемых образцов увеличивается. Однако необходимо отметить, что при увеличении числа k спектральных каналов резко увеличивается количество операций при обработке массивов данных, что приводит существенному возрастанию времени анализа. Аналогичный рост вычислительных затрат происходит и при увеличении числа уровней квантования (градаций яркости – m). Сокращение числа уровней квантования повышает быстродействие, однако, это приводит к ухудшению качества изображения и далеко не всегда применимо в данных исследованиях.

На рисунке 9 приведены спектральные характеристики, построенные для точки изображения исследуемых образцов бумаги, с использованием гиперспектрального метода визуализации при помощи аппаратуры «FS-23».

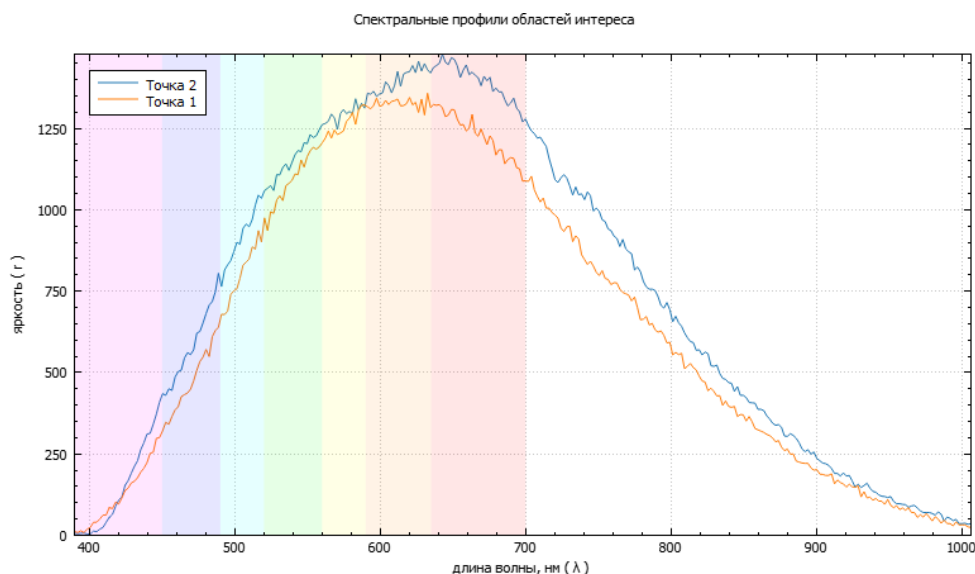


Рисунок 9. СХ полученные при помощи гиперспектральной системы «FS-23»

На графиках точка 1 соответствует тестовому образцу ручного отлива, а точка 2 соответствует образцу обычной бумаги. Как видно из рисунка 9, совпадение СХ практически отсутствует.

Заключение

Рассмотренные методы телевизионной спектральной визуализации и обработки получаемых изображений с целью формирования спектральных характеристик и спектральных гистограмм обеспечивают дифференциацию исследуемых образцов бумажной основы документов при разной степени сложности, быстродействия и точности.

Наиболее простые в технической реализации методы, связанные с формированием и анализом *rgb* изображений могут быть рекомендованы для экспресс-анализа больших массивов документов.

Более сложные в технической реализации методы, связанные с мульти- и гиперспектральной визуализацией, а также методы, требующие больших вычислительных ресурсов для анализа изображений, в частности построение спектральных гистограмм и спектральная селекция, могут быть рекомендованы для углубленных исследований документов, представляющих особый интерес.

Список литературы

1. Балаченкова А. П., Ляховицкий Е. А., Цыпкин Д. О. Проблемы и перспективы применения спектрозональной визуализации в исследованиях памятников

письменности // Вестник Санкт-Петербургского университета. История. 2021. 66(3). 950-970. DOI: 10.21638/spbu02.2021.315

2. Методы и оборудование контроля качества полиграфических материалов: справочник для студентов специальностей 1-47 01 01 «Издательское дело», 1-47 02 01 «Технология полиграфических производств» / сост.: А. А. Губарев, М. А. Зильберглейт. Минск: БГТУ, 2012. 51 с.

3. Григорьева И. А., Колосова М. И., Хаврин С. В., Чугунова К. С. Особенности применения спектральных методов при исследовании музейных объектов // Фотография. Изображение. Документ. 2013. 4(4). 88-95.

4. Техничко-криминалистическая экспертиза документов: учебник / под редакцией: В. Е. Ляпичева, Н. Н. Шведовой. Волгоград: ВА МВД России, 2005. 268 с.

5. Деркачева О. Ю. Анализ ИК-спектров отражения исторических бумаг // Фотография. Изображение. Документ. 2013. 4(4). 23-31.

6. Борисов Д. И. Оптико-электронное устройство для оценки характеристик бумажной основы документов // Дни науки и инноваций НовГУ: материалы XXVII научной конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ, Великий Новгород, 06–11 апреля 2020 года: в 3 ч. Ч. 3. Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 2020. С. 120-126. DOI: 10.34680/978-5-89896-668-3/2020.DN-3.17

7. Корнышев Н. П., Лифар А. В., Ляховицкий Е. А., Родионов И. С., Цыпкин Д. О., Шеин Г. М. Телевизионные и оптико-электронные методы исследования исторических бумаг // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2013. 1-2. 153-158.

8. Корнышев Н. П., Лифар А. В., Ляховицкий Е. А., Родионов И. С., Цыпкин Д. О., Шеин Г. М. Телевидение в исследовании исторических бумаг // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2014. 1. 30-37.

9. Корнышев Н. П., Родионов И. С., Ляховицкий Е. А. Оптико-электронные и телевизионные методы и средства в историко-бумажоведческих исследованиях рукописно-книжных памятников // Фотография. Изображение. Документ. 2013. 4(4). 63-72.

10. Обухова Н. А., Баранов П. С., Мотыко А. А., Чиркунова А. А. Гиперспектральная система анализа и восстановления архивных документов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 2. 32-43.

11. Зубарев Ю. Б., Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Спектрозональные методы и системы в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. 1. 47-64.

12. Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. К вопросу выбора зон регистрации в спектрозональном телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2011. 2. 3-25.

13. Быков Р. Е. Основы телевидения и видеотехники: учебник для студентов вузов. Москва: Горячая линия – Телеком, 2006. 399 с.

14. Зубарев Ю. Б., Селькин В. В. Перестраиваемый ПЗС датчик в спектрозональной телевизионной системе // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. 1980. 5. 30-34.

15. Зубарев Ю. Б., Зайцева З. В., Главач А. А. [и др.] Оптимизация спектрального фильтра в оптическом звене прикладной телевизионной системы // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. 1991. 3. 33-41.

16. Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2006. 3(64). 11-24.

17. Оптические узкополосные фильтры GCC-2010 в оправе // LASER components: официальный сайт. URL: <https://lasercomponents.ru/product/optika/interferentsionnye-filtry/opticheskie-uzkopolosnye-filtry/opticheskie-uzkopolosnye-filtry-gcc-2010-v-oprave> (дата обращения: 10.01.2024).
18. ГОСТ 9411-91. Е. Стекло оптическое цветное: технические условия / Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. 1993. 49 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820910.pdf?ysclid=lt1d3oi631731615840> (дата обращения: 10.01.2024).
19. Корнышев Н. П., Никитин Н. С., Андреева Е. В., Бутусов В. В., Тимофеева А. В. Патент № 116727 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01). Телевизионная спектральная система для исследования документов: № 2012101984/07, 2012.01.20, заявл. 2012.01.20: опубл. 2012.05.27 / патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт промышленного телевидения «Растр».
20. Корнышев Н. П. Новые возможности телевизионных спектральных систем // Фотография. Изображение. Документ. 2015. 6(6). 83-93.
21. Калитов М. А., Корнышев Н. П. Патент № 2754966 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01), G06T 7/136 (2017.01). Способ телевизионной спектральной селекции изображений объектов: № 2021105004, 2021.02.26, заявл. 2021.02.26: опубл. 2021.09.08 / патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».
22. Прэтт У. Цифровая обработка изображений в 2-х кн. Кн. 2. / перевод с английского, под редакцией Д. С. Лебедева. Москва: Мир, 1982. 480 с.
23. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / перевод с английского В. В. Чепыжова. Москва: Техносфера, 2006. 616 с.
24. Старовойтов В. В., Голуб Ю. И. Получение и обработка изображений на ЭВМ: учебно-методическое пособие. Минск: БНТУ, 2018. 204 с.
25. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
26. Телевизионная спектральная система «Криминалист-2Ц» // АО НИИПТ «Растр»: официальный сайт. URL: <http://www.rastr.natm.ru/products/kriminal/models/kriminalist-2.htm> (дата обращения: 10.01.2024).
27. Imaging hyperspectral camera FS2X series // FIGSPEC: official website. URL: <https://www.figspec.com/en/h-col-141.html> (дата обращения: 20.12.2023).
28. Корнышев Н. П., Гареев В. М., Гареев М. В., Серебряков Д. А. Особенности формирования псевдогиперспектральных изображений из RGB компонент // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177

References

1. Balachenkova A.P., Lyakhovitskii E.A., Tsyarkin D.O. Problemy i perspektivy primeneniya spektrozonal'noy vizualizatsii v issledovaniyakh pamyatnikov pis'mennosti [Problems and prospects of application of multispectral imaging in the manuscript studies] // Vestnik of St. Petersburg State University. History. 2021. 66(3). 950-970. DOI: 10.21638/spbu02.2021.315
2. Metody i oborudovaniye kontrolya kachestva poligraficheskikh materialov: spravochnik dlya studentov spetsial'nostey 1-47 01 01 «Izdatel'skoye delo», 1-47 02 01 «Tekhnologiya poligraficheskikh proizvodstv» [Methods and equipment for quality control of printing materials: a reference book for students of specialties 1-47 01 01 "Publishing",

1-47 02 01 "Technology of Printing Production"] / compiled by: A. A. Gubarev, M. A. Zilbergleit. Minsk: BSTU, 2012. 51 p. /

3. Grigorieva I. A., Kolosova M. I., Khavrin S. V., Chugunova K. S. Osobennosti primeneniya spektral'nykh metodov pri issledovanii muzeynykh ob'yektov [Features of the use of spectral methods in the study of museum objects] // Photography. Image. Document. 2013. 4(4). 88-95.

4. Tekhniko-kriminalisticheskaya ekspertiza dokumentov: uchebnik [Technical and forensic examination of documents: textbook] / edited by V. E. Lyapicheva, N. N. Shvedova. Volgograd: Volgograd Academy of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2005. 268 p.

5. Dercacheva O. Yu. Analiz IK-spektrov otrazheniya istoricheskikh bumag [Analysis of IR reflection spectra of historical papers] // Photography. Image. Document. 2013. 4(4). 25-31.

6. Borisov D. I. Optiko-elektronnoye ustroystvo dlya otsenki kharakteristik bumazhnoy osnovy dokumentov [Optical-electronic device for assessing the characteristics of the paper base of documents] // NovSU Days of Science and Innovation: materials of the XXVII scientific conference of teachers, graduate students and students of NovSU, Veliky Novgorod, April 06–11, 2020: in 3 parts. Part 3. Veliky Novgorod: Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2020. P. 120-126. DOI: 10.34680/978-5-89896-668-3/2020.DN-3.17

7. Kornyshev N. P., Lifar A. V., Lyakhovitsky E. A., Rodionov I. S., Tsyppin D. O., Shein G. M. Telezionnyye i optiko-elektronnyye metody issledovaniya istoricheskikh bumag [Television and optical-electronic methods for studying historical papers] // Systems and television and radio communications. 2013. 1-2. 153-158.

8. Kornyshev N. P., Lifar A. V., Lyakhovitsky E. A., Rodionov I. S., Tsyppin D. O., Shein G. M. Televizeniye v issledovanii istoricheskikh bumag [Television in study of the history papers] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televizeniya. 2014. 1. 30-37.

9. Kornyshev N. P., Rodionov I. S., Lyakhovitsky E. A. Optiko-elektronnyye i telezionnyye metody i sredstva v istoriko-bumagovedcheskikh issledovaniyakh rukopisno-knizhnykh pamyatnikov [Optical-electronic and television methods and means in historical and paper studies of manuscripts and book monuments] // Photography. Image. Document. 2013. 4(4). 63-72.

10. Obukhova N. A., Baranov P. S., Motyko A. A., Chirkunova A. A. Giperspektral'naya sistema analiza i vosstanovleniya arkhivnykh dokumentov [Hyperspectral document analysis and recovery system] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televizeniya. 2023. 2. 32-43.

11. Zubarev Yu. B., Sagdullaev Yu. S., Sagdullaev T. Yu. Spektrozonal'nyye metody i sistemy v kosmicheskom televizanii [Multi-wave-zones methods and systems in space TV] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televizeniya. 2009. 1. 47-64.

12. Sagdullaev T. Yu., Sagdullaev Yu. S. K voprosu vybora zon registratsii v spektrozonal'nom televizanii [To the question of the choice of zones of registration in spectrozonal television] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televizeniya. 2011. 2. 3-25.

13. Bykov R. E. Osnovy televizeniya i videotekhniki: uchebnik dlya studentov vuzov [Fundamentals of television and video technology: a textbook for university students]. Moscow: Hot line –Telecom, 2006. 399 p.

14. Zubarev Yu. B., V. V. Selkin Perestraivayemyy PZS datchik v spektrozonal'noy telezionnoy sisteme [Tunable CCD sensor in a spectrozonal television system] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televizeniya. 1980. 5. 30-34.

15. Zubarev Yu. B., Zaitseva Z. V., Glavach A. A. [et al.] Optimizatsiya spektral'nogo fil'tra v opticheskom zvene prikladnoy telezionnoy sistemy [Optimization of

a spectral filter in the optical link of an applied television system] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya. 1991. 3. 33-41.

16. Kalinin A.P., Orlov A.G., Rodionov I.D. Aviatsionnyy giperspektrometr [Aviation hyperspectrometer] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2006. 3(64). 11-24.

17. Opticheskiye uzkopolosnyye fil'try GCC-2010 v oprave [Optical narrowband filters GCC-2010 in a frame] // LASER components: official website. URL: <https://lasercomponents.ru/product/optika/interferentsionnye-fil'try/opticheskie-uzkopolosnye-fil'try/opticheskie-uzkopolosnye-fil'try-gcc-2010-v-oprave> (accessed: 10.01.2024).

18. GOST 9411-91. E. Steklo opticheskoye tsvetnoye: tekhnicheskiye usloviya [Colored optical glass: technical conditions] / Committee for Standardization and Metrology of the USSR. Moscow. 1993. 49 p. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294820/4294820910.pdf?ysclid=lt1d3oi631731615840> (accessed: 10.01.2024).

19. Kornyshev N. P., Nikitin N. S., Andreeva E. V., Butusov V. V., Timofeeva A. V. Patent No. 116727 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01). Televizionnaya spektral'naya sistema dlya issledovaniya dokumentov [Television spectral system for document research]: No. 2012101984/07, 2012.01.20, application 2012.01.20: publ. 2012.05.27 / patent holder Open Joint Stock Company "Research Institute of Industrial Television "Rastr".

20. Kornyshev N. P. Novyye vozmozhnosti televizionnykh spektral'nykh sistem [New possibilities of television spectral systems] // Photography. Image. Document. Saint-Petersburg, 2015. 6(6). 83-93.

21. Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Patent No. 2754966 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01), G06T 7/136 (2017.01). [Method for television spectral selection of images of objects]: № 2021105004, 2021.02.26, application 2021.02.26: publ. 2021.09.08 / patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University".

22. Pratt W. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing] in 2 books. Book 2. / translated from English, edited by D. S. Lebedev. Moscow: Mir, 1982. 480 p.

23. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB [Digital image processing in MATLAB] / translated from English by V. V. Chepyzhov. Moscow: Technosfera, 2006. 616 p.

24. Starovoitov V. V., Golub Yu. I. Polucheniye i obrabotka izobrazheniy na EVM: uchebno-metodicheskoye posobiye [Receiving and processing images on a computer: educational manual]. Minsk: BNTU, 2018. 204 p.

25. Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of computer image processing] / edited by V. A. Soifer. 2nd ed., rev. Moscow: FIZMATLIT, 2003. 784 p.

26. Televizionnaya spektral'naya sistema «Kriminalist-2TS» [Television spectral system "Criminalist-2C"] // JSC NIPT "Rastr": official website. URL: <http://www.rastr.natm.ru/products/kriminal/models/kriminalist-2.htm> (accessed: 10.01.2024).

27. Imaging hyperspectral camera FS2X series // FIGSPEC: official website. URL: <https://www.figspec.com/en/h-col-141.html> (accessed: 20.12.2023).

28. Kornyshev N. P., Gareev V. M., Gareev M. V., Serebryakov D. A. Osobennosti formirovaniya psevdogiperspektral'nykh izobrazheniy iz RGB komponent [Features of the formation of pseudo-hyperspectral images from RGB components] // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177

Информация об авторах

Гареев Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-1585-6792, Vladimir.Gareev@novsu.ru

Гареев Михаил Владимирович – ведущий инженер, лаборатория «Техническое зрение», Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0007-1392-2169, Mikhail.Gareev@novsu.ru

Калитов Михаил Андреевич – ведущий инженер, АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0002-9419-2447, mikhail.kalitov@yandex.ru

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

Серебряков Дмитрий Александрович – ассистент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0000-5994-5090, s231099@std.novsu.ru

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 654.165

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

ГРНТИ 49.43.29

Специальность ВАК 2.2.15

Научная статья

ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАНКИНГОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А.

МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация В статье рассмотрено проектирование транкинговой системы связи с использованием предложенного метода автоматического размещения базовых станций и разработанного программного обеспечения. Целью работы является снижение трудоемкости проектирования транкинговых систем связи. В методе автоматического размещения особое внимание уделяется расчету необходимого количества каналов для организации связи между заданным количеством абонентов. Научная новизна представленного решения заключается в том, что в методе автоматического размещения базовых станций координаты мест их установки определяются с помощью предложенного жадного алгоритма, в котором расчет зон обслуживания базовых станций осуществляется на основе модифицированной модели Хата. Затем для полученных координат мест установки базовых станций проводится уточненный расчет зон обслуживания с учетом дополнительных потерь на дифракцию, тропосферное рассеивание и потерь в атмосферном волноводе. После чего определяется зона гарантированного обслуживания. Представлены результаты проектирования транкинговой системы связи в разработанном программном обеспечении, приведены графики зависимости времени расчета жадного алгоритма от площади территории, которую необходимо покрыть связью.

Ключевые слова: *транкинговые системы связи, частотно-территориальное планирование, автоматического размещение, зона обслуживания, системы подвижной связи*

Для цитирования: Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Частотно-территориальное планирование транкинговых систем связи // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 57-68. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

Research Article

FREQUENCY-TERRITORIAL PLANNING OF TRUNKING COMMUNICATION SYSTEMS

Ivanov V. S., Uvaysov S. U., Ivanov I. A.

MIREA-Russian technological university (Moscow, Russian Federation)

Abstract The article considers the design of a trunking communication system using the proposed method of automatic placement of base stations and the developed software. The aim of the work is to reduce the complexity of designing trunking communication systems. In the automatic placement method, special attention is paid to calculating the required number of channels for organizing communication between a given number of subscribers. The scientific novelty of the presented solution lies in the fact that in the method of automatic placement of base stations, the coordinates of their installation locations are determined using the proposed greedy algorithm, in which the calculation of the service areas of base stations is carried out on the basis of a modified Hut model. Then, for the obtained coordinates of the base station installation sites, an updated calculation of the service areas is carried out, taking into account additional diffraction losses, tropospheric scattering and losses in the atmospheric waveguide. After that, the guaranteed service area is determined. The results of the design of the trunking communication system in the developed software are presented, graphs of the dependence of the calculation time of the greedy algorithm on the area of the territory that needs to be covered by the connection are given.

Keywords: *trunking communication systems, frequency-territorial planning, automatic placement, service area, mobile communication systems*

For citation: Ivanov V. S., Uvaysov S. U., Ivanov I. A. Frequency-territorial planning of trunking communication systems // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 57-68. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).57-68

Введение

Система радиосвязи представляет совокупность радиоэлектронных средств и среды распространения, осуществляющих передачу информации от источника к получателю посредством радиоволн в открытом пространстве [1]. В системах радиосвязи, в первую очередь, выделяются системы подвижной связи: сотовая, транкинговая, персональная и спутниковая связь. Характерной чертой систем подвижной связи является возможность повторения одних и тех же радиочастотных каналов связи, что в свою очередь, позволяет сэкономить на получении разрешений их использования. Если территория, которую необходимо покрыть связью, делится на несколько зон(сот), то использование одинаковых частот в ближайших сотах нежелательно из-за появления взаимных помех.

В транкинговых системах связи (ТСС) обеспечивается автоматическое распределение каналов связи. В основе этой идеи лежит выделение определенного количества каналов всем пользователям системы [2]. То есть абоненты не закрепляются за определенными каналами связи, что решает проблему неравномерного использования доступных частот, когда один из каналов связи перегружен, а соседний практически всё время свободен. Такой принцип организации радиосвязи позволяет получить значительную экономию радиочастотного ресурса при большом количестве абонентов [3]. Благодаря высокой скорости установления соединения, менее 0,5 сек, возможности группового подключения и приоритизации, пользователями ТСС являются службы спасения, службы охраны и безопасности. Обеспечение безопасности на чемпионате мира по футболу в России в 2018 году велось с помощью ТСС. Помимо перечисленных выше служб ТСС пользуются крупные добывающие полезные ископаемые предприятия и сельскохозяйственные организации. В центре зоны, которую необходимо покрыть связью, устанавливается базовая станция (БС), в состав которой входит приемопередающее оборудование, антенно-фидерное оборудование, контроллеры управления и многое другое.

Антенны базовых станций могут быть ненаправленными, то есть осуществлять передачу сигнала одинаковой мощности во всех направлениях, и направленными (секторными), когда сигнал излучается в определенном направлении. При использовании ненаправленных антенн абонентские станции принимают помехи от всех соседних станций, тогда как использование направленных антенн позволяет снизить уровень взаимных помех и более эффективно использовать частотный ресурс сети, чаще повторяя частоты в сотах. Совокупность ближайших сот, в которых невозможно использовать одни

и те же частотные каналы называется кластером. Размерность кластера определяется числом сот в его составе [4].

На рисунке 1 приведен пример кластеров с размерностью -3. Каждый кластер выделен цветом и состоит из трех сот, в которых используются три различные пары частот, одна на прием, другая на передачу. Повторное использование частот возможно в сотах, удаленных друг от друга на расстояние D, называемое защитным интервалом. Использование одних и тех же частотных каналов в смежных сотах невозможно. В общем случае расстояние D можно выразить по следующей формуле:

$$D = R * \sqrt{3C}, \quad (1)$$

где R – радиус соты, C – количество БС в кластере.

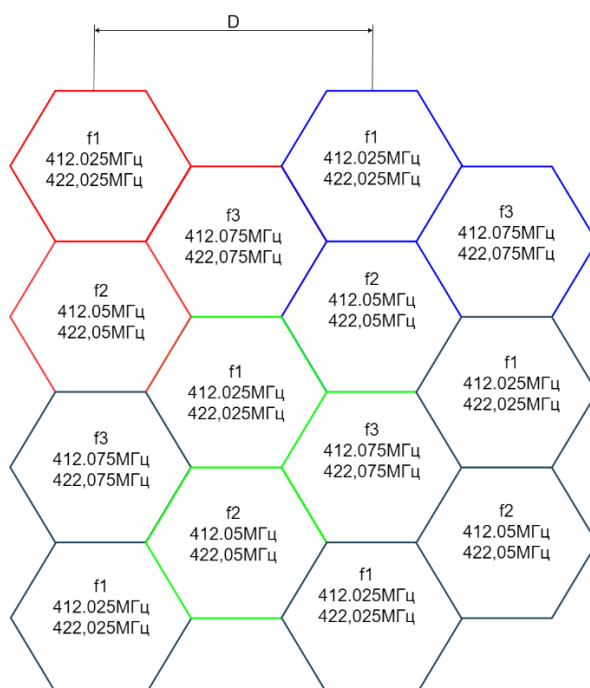


Рисунок 1. Трехэлементый кластер

Смежные базовые станции, использующие различные наборы частотных каналов, образуют группу из $C=3$ станций. Если каждой базовой станции выделяется набор из $m=2$ каналов с шириной полосы каждого $F_k=25\text{кГц}$, то общая ширина полосы, занимаемая системой сотовой связи, составит:

$$F_C = F_k * m * C = 25 * 2 * 3 = 150\text{кГц}. \quad (2)$$

Таким образом, величина C определяет минимально возможное число каналов в системе, поэтому ее часто называют частотным параметром системы, или коэффициентом повторения частот. Размер ячеек R определяет защитный интервал между ячейками. Уменьшение радиуса ячейки позволяет повысить

эффективность использования выделенной полосы частот, увеличить абонентскую емкость системы, уменьшить мощность передатчиков и чувствительность приемников базовых и подвижных станций. Что приводит к улучшению электромагнитной совместимости средств сотовой связи с другими радиоэлектронными средствами и системами. С другой стороны, чрезмерное уменьшение радиуса ячеек приводит к значительному увеличению числа пересечений подвижными абонентами границ ячеек, что может вызвать перегрузку устройств управления и коммутации системы, а также увеличить число случаев возникновения взаимных помех. В связи с этим в реальных условиях при выборе величины R приходится учитывать все вышеперечисленные обстоятельства и находить компромиссное решение.

Использование секторных антенн с узкими диаграммами направленности позволяет снизить уровень помех, т. к. сигнал излучается в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Если использовать трехсекторные антенны с шириной диаграммы направленности 120° для каждой базовой станции (рисунок 2), то каждый сектор будет иметь свою полосу частот, что увеличит количество обслуживаемых абонентов. Возможны и другие варианты дробления ячеек, причём этот приём широко используется для участков сети с напряженным трафиком в интересах обеспечения необходимой ёмкости системы.

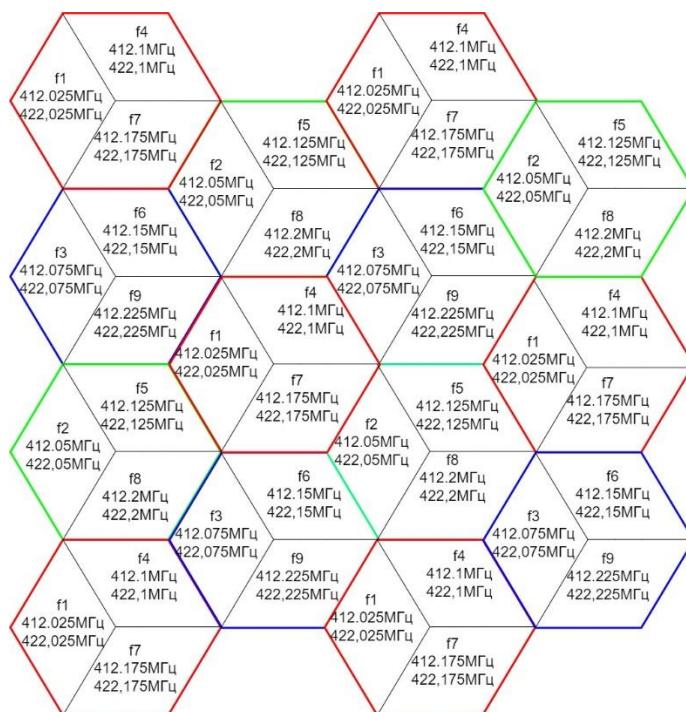


Рисунок 2. Семизлементный кластер

Деление территории, которую необходимо покрыть связью, на соты происходит на основе статистических и детерминированных методов

распространения сигналов в системах связи. В статистических методах вся обслуживаемая территория делится на ячейки равного размера, который определяется на основе известных моделей, таких как модель Окумуры, модель Окумуры-Хата, модель Лонгли-Райса и др. При расчете размеров ячеек на основе детерминированных методов тщательно рассчитывают и измеряют параметры системы, учитывают фактор влияния препятствий на трассе распространения радиосигнала, определяют оптимальные места расположения БС с учетом рельефа местности.

Частотно-территориальное планирование сети

Для обеспечения связью нужного числа пользователей необходимо иметь достаточное количество каналов связи. При определенном количестве каналов можно обслужить определенное количество абонентов, хотя, разумеется, в некоторых случаях абоненты в ответ на вызов будут получать отказ [5]. Транкинговая система связи является системой массового обслуживания – со случайным потоком вызовов, случайной их продолжительностью и конечным числом каналов обслуживания. В качестве первой математически корректной работы по теории массового обслуживания называют работу Эрланга «Теория вероятностей и телефонные разговоры», опубликованную в 1908 г. [6]. Для определения среднего трафика A , выражаемого в эрлангах, необходимо знать среднюю продолжительность обслуживания одного вызова T и среднюю частоту поступления вызовов λ в единицу времени. Для удобства рекомендуется использовать одну единицу времени для измерения T и λ . Формула среднего трафика:

$$A = T * \lambda \text{ [Эрл]} \quad (3)$$

Вызовы в системе связи могут сбрасываться (модель Эрланга В, система с отказами), становиться в очередь и ждать освобождения канала неопределенно долгое время (модель Эрланга С, система с ожиданиями), становиться в очередь и ждать освобождения канала в течение ограниченного интервала времени (модель Эрланга А). При оценках емкости систем подвижной связи обычно используется модель Эрланга В и модель Эрланга С, которые дают достаточно близкие результаты при малых вероятностях отказа $P_B=0,002\dots 0,05$.

Частота поступления вызовов, являющаяся случайно величиной, за время t :

$$P_k = \frac{(\lambda * t)^k}{k!} * e^{-\lambda * t}. \quad (4)$$

При этом среднее число вызовов на интервале t равно:

$$k = \lambda * t. \quad (5)$$

Продолжительность обслуживания одного вызова – непрерывная случайная величина τ , которая описывается экспоненциальным распределением:

$$W(\tau) = \frac{1}{T} * e^{\frac{-\tau}{T}}. \quad (6)$$

В системе с отказами вероятность отказа определяется:

$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N (A^n / n!)}, \quad (7)$$

где N – количество каналов, A – трафик.

Формула 7 достаточно громоздка и на практике пользуются ее представлением в виде таблицы. По сокращенной таблице 1 можно определить требуемое количество каналов связи для обработки нагрузки трафика.

Таблица 1. Модель Эрланга В

Число каналов	Вероятность отказа P _B				
	0,002	0,01	0,02	0,05	0,1
1	0,02	0,01	0,02	0,05	0,11
2	0,07	0,15	0,22	0,38	0,6
5	0,9	1,36	1,66	2,22	2,88
10	3,4	4,5	5,1	6,2	7,5
20	10,1	12	13,2	15,2	17,6
30	17,6	20,3	21,9	24,8	28,1
40	25,6	29,01	31	34,6	38,79
50	33,9	37,9	40,26	44,53	49,56
60	42,4	46,95	49,64	54,57	60,4
70	51	56,11	59,13	64,67	71,29
80	59,7	65,4	68,7	74,8	82,2

В данной статье описан разработанный метод автоматического размещения БС, позволяющий снизить трудоемкость и сократить процесс проектирования ТСС (рисунок 3). На первом этапе метода на основе разработанного алгоритма определяются координаты места установки БС и происходит расчет зоны обслуживания БС статистическим методом на основе модифицированной модели Хата [7]. Далее происходит уточненный расчет зоны обслуживания с учетом дополнительных потерь на дифракцию, тропосферное рассеивание и потерь в атмосферном волноводе [8]. На третьем этапе выводится поправочный коэффициент и определяется зона гарантированного обслуживания БС.

Для проектирования ТСС разработан веб-сайт на языке программирования Python. В разработанном программном обеспечении (ПО) пользователю необходимо задать сокращенный и расширенный набор параметров. В сокращенном наборе указывается количество абонентов, которых необходимо обеспечить связью, среднее количество вызовов каждого абонента в час, средняя продолжительность вызовов, среда распространения сигнала, частота передачи и высоты подвеса антенн БС и портативной станции (ПС).

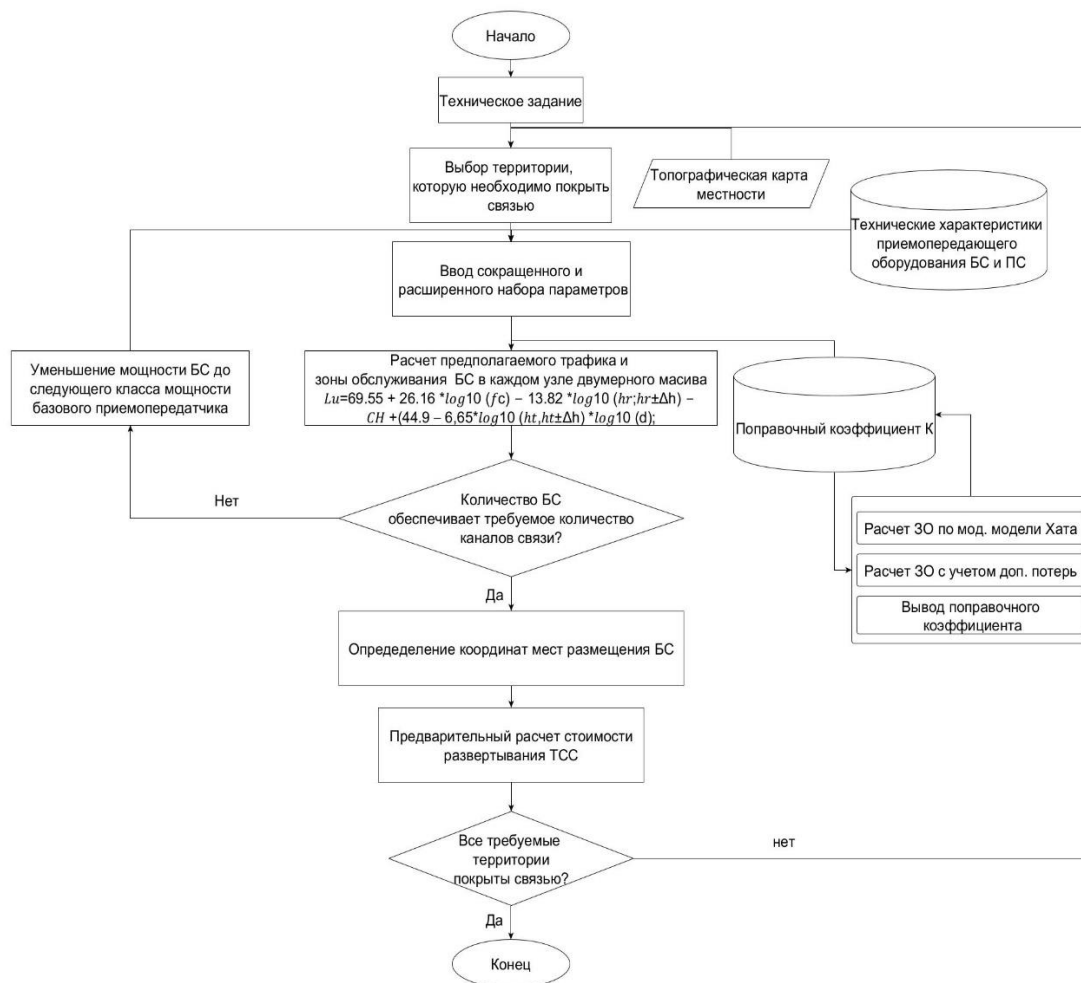


Рисунок 3. Метода автоматического размещения

Вышеперечисленные параметры являются обязательными. В расширенном наборе параметров задаются технические характеристики приемопередающего оборудования БС и ПС: мощности передатчиков, чувствительности приемников, коэффициенты усиления антенн, коэффициенты потерь в фидерах. Расширенный набор параметров можно заполнить «по умолчанию», тогда автоматически будут использоваться значения, занесенные в код разработчиками.

Рисунок 4. Интерфейс ПО

Проектирование транкинговой системы связи

Рассмотрим реализацию представленного метода в ПО на конкретном примере. Допустим, необходимо спроектировать ТСС в предполагаемом месте добычи нефти недалеко от города Ухта – Родине первой российской нефти. Известно общее количество абонентов – 130, средняя продолжительность вызовов – 15 сек или $1/240$ ч, среднее количество вызовов – 120 выз/час, высота подвеса антенны БС – 50 м, высота подвеса антенны ПС – 1,5 м. Требуется определить необходимое количество базовых станций (четырёхканальных) и координаты мест их размещения. В таблице 2 представлены технические характеристики приемопередающего оборудования БС и ПС.

Таблица 2. Технические характеристики приемопередающего оборудования

Параметры	БС	ПС
Мощность передатчика, дБм	44	30
Коэффициент потерь в фидере, дБм	-6	0
Коэффициент усиления антенны, дБм	8	-6
Чувствительность приемника, дБм	-106	-103

Определение необходимого количества каналов начинается с расчета трафика на одного абонента:

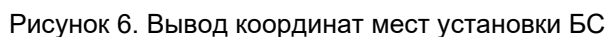
$$A = T * \lambda = \frac{1}{240} * 120 = 0,5 \text{ Эрл.} \quad (8)$$

Средний трафик на всех абонентов:

$$A_{\text{ср}} = A * 130 = 65 \text{ Эрл.} \quad (9)$$

Если требуется обеспечить вероятность отказа 0,01, то необходимое количество каналов – 80. Далее всё зависит от канальности используемых БС и способа использования радиочастот (TDMA, FDMA, CDMA). Предположим, что используется базовая станция с временным разделением каналов связи TDMA, количество несущих – 4. Такая базовая станция способна обеспечить абонентов 32 логическими каналами одновременного использования. Таким образом минимальное количество базовых станций, покрывающих заданную территорию и обеспечивающих требуемое количество каналов – 3.

В программном обеспечении пользователь задает вышеперечисленные наборы параметров, на топографической карте выделяет территорию, которую необходимо покрыть связью. Если внутри заданной территории есть места, установка БС в которых невозможна, например, водные преграды, закрытые территории, то необходимо выделить специальным инструментом данные территории. После чего можно запустить расчет.



№ БС	Координаты
1	63.448719, 54.408681
2	63.424064, 54.428701
3	63.441981, 54.348621

На полузакрытом интервале, когда линия прямой видимости не пересекает рельеф местности и местных предметов, а зона Френеля пересекает, на распространение сигналов оказывает влияние подстилающая поверхность. На закрытом интервале линия прямой видимости пересекает рельеф местности, что может привести к существенному ослаблению сигналов на входе приемника и нарушении устойчивости на радиолинии.

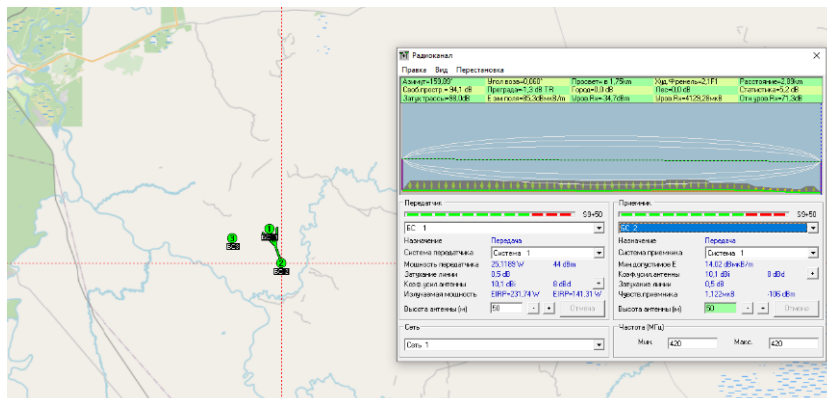


Рисунок 7. Профиль радиолинии BC1-BC3

Заключение

В результате работы предложен метод автоматического размещения БС внутри заданной территории, который позволяет снизить трудоемкость проектирования ТСС. Количество БС зависит от минимального количества каналов, необходимых для организации связи между заданным количеством абонентов. Разработано программное обеспечение, реализующее проектирование ТСС. Приведен пример проектирования ТСС в ПО. Представлены графики зависимости времени расчета координат мест размещения БС от площади территории, которую необходимо покрыть связью. На рисунке 8 представлена зависимость времени проведения расчета от площади территории, которую необходимо покрыть связью при высотах антенн $h_{BC}=50\text{м}$ и $h_{PC}=1,5\text{м}$.



Рисунок 8. Зависимость времени расчета размещения БС от площади территории при высотах антенн $h_{BC}=50\text{м}$ и $h_{PC}=1,5\text{м}$

Исходя из полученных значений, можно сделать вывод, что координаты мест размещения БС на территории, располагающейся в сельской местности, площадью 400 км² рассчитываются за 6,64 сек.

Уменьшив высоту подвеса антенны БС до 30м и повторив расчет получены данные, представленные на рисунке 9.

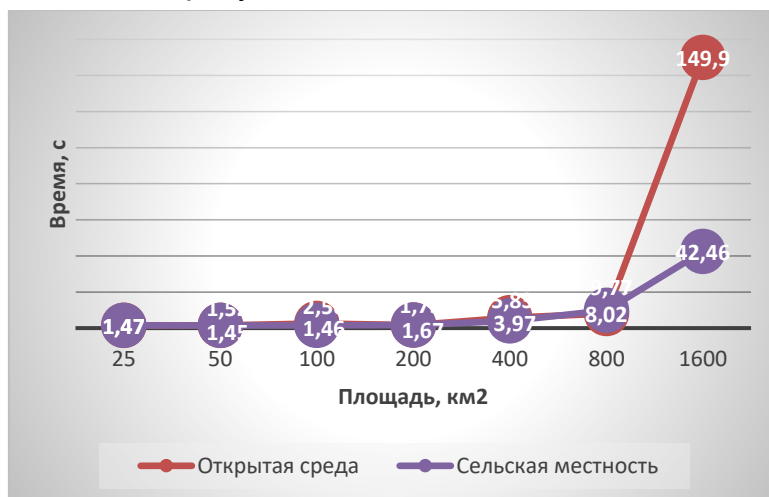


Рисунок 9. Зависимость времени расчета размещения БС от площади территории при высотах антенн $h_{БС}=30\text{м}$ и $h_{ПС}=1,5\text{м}$

Для получения координат мест размещения БС на территории того же размера потребовалось 3,97 сек. Увеличение скорости расчета связано с тем, что радиус зоны обслуживания БС при высоте подвеса антенны 50 м больше, чем при высоте подвеса антенны 30 м, в связи с чем проводятся дополнительные расчеты для определения максимального радиуса зоны обслуживания БС.

Список литературы

1. Сакалема Д. Ж. Подвижная радиосвязь. Москва: Горячая линия - Телеком, 2012. 512 с.
2. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи / перевод с польского Н. И. Рудинского. Москва: Горячая линия - Телеком, 2006. 536 с.
3. Садамовский А. С. Приёмо-передающие радиоустройства и системы связи: учебное пособие. Ульяновск: УЛГТУ, 2007. 238 с.
4. Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учебное пособие / 2-е изд., испр. Москва: Горячая линия - Телеком, 2007. 224 с.
5. Ратынский М. В. Основы сотовой связи. Москва: Радио и связь, 1998. 248 с.
6. Майзер Х., Эйджин Н., Тролл Р. [и др.] Исследование операций: в 2-х т. / под редакцией Дж. Моудера, С. Элмаграби; перевод с английского И. М. Макарова, И. М. Бескровного. Москва: Мир, 1981. Т. 1: Методические основы и математические методы. 712 с.
7. Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Алгоритм расчета зоны обслуживания базовой станции транкинговой системы связи // Научные технологии. 2023. 4. 12-20. DOI: 10.18127/j19998465-202304-0

8. Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ: рекомендация МСЭ-R P.1812-4. Женева: ITU, 2015. 34 с. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1812-4-201507-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 21.12.2023).

References

1. Sakalema D. J. Mobile radio communication. Moscow: Hotline - Telecom, 2012. 512 p.
2. Wesolovsky K. Mobile radio communication systems / translated from Polish by N. I. Rudinsky. Moscow: Hotline - Telecom, 2006. 536 p.
3. Sadomovsky A. S. Receiving and transmitting radio devices and communication systems: a textbook. Ulyanovsk: ULSTU, 2007. 238 p.
4. Babkov V. Yu., Voznyuk M. A., Mikhailov P. A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning: a textbook / 2nd ed., ispr. Moscow: Hotline - Telecom, 2007. 224 p.
5. Ratynsky M. V. Fundamentals of cellular communication. Moscow: Radio and Communications, 1998. 248 p.
6. Maizer H., Agin N., Troll R. [et al.] Operations research: in 2 volumes / edited by J. Moudier, S. Elmagrabi; translated from English by I. M. Makarov, I. M. Beskrovny. Moscow: Mir, 1981. Vol. 1: Methodological foundations and mathematical methods. 712 p.
7. Ivanov V. S., Uvaisov S. U., Ivanov I. A. Algorithm for calculating the service area of the base station of the trunking communication system // High-tech technologies. 2023. 4. 12-20. DOI: 10.18127/j19998465-202304-02
8. A method for predicting signal propagation on a specific route for ground services "from point to zone" in the UHF and VHF bands: recommendation ITU-R P.1812-4. Geneva: ITU, 2015. 34 p. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1812-4-201507-I !!PDF-R.pdf (accessed: 21.12.2023).

Информация об авторах

Иванов Вячеслав Сергеевич – аспирант, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru

Увайсов Сайгид Увайсович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-1943-6819, uvajsov@mirea.ru

Иванов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент, МИРЭА-Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-1266-0228, ivanov_ia@mirea.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.382

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).69-75

ГРНТИ 47.13.11

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Гаврушко В. В.¹, Григорьев А. Н.², Кадриев О. Р.¹

¹ Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

² ООО «Промышленные дроссели» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Приводится описание апробированного варианта стенда для исследования температурной зависимости интегральной токовой чувствительности фотоприемников. Был разработан оригинальный оптический термостат, с вертикальным ходом луча, что позволило исключить использование дополнительных оптических окон. Предлагаемая конструкция термостата позволяла производить измерения как в области низких, так и высоких температур. В качестве источника излучения использована модель АЧТ с температурой 800 К. В качестве датчика температуры был использован прямосмещённый эмиттерный переход германиевого транзистора. Ток смещения составлял 100 мкА. Приведены электрические схемы датчика и регистратора сигналов для фотодиода. Выполнена градуировка датчика температуры в диапазоне от 77 до 373 К.

Ключевые слова: *стенд, оптический термостат, датчик температуры, фотоприемник, токовая чувствительность*

Для цитирования: Гаврушко В. В., Григорьев А. Н., Кадриев О. Р. Стенд для исследования температурной зависимости интегральной токовой чувствительности фотоприемников // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 69-75. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).69-75

Research Article

STAND FOR STUDYING THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE INTEGRAL CURRENT SENSITIVITY OF PHOTODETECTORS

Gavrushko V. V.¹, Grigoriev A. N.², Kadriev O. R.¹

¹ Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

² LLC "Promyshlennyye drosseli" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract A tested version of a test bench for studying the temperature dependence of the integrated current sensitivity of photodetectors is described. An original optical thermostat with a vertical beam path was used. This has made it possible to avoid the use of additional optical windows in the thermostat. Temperature control was carried out by a forward-biased emitter junction of a germanium transistor. The bias current was 100 μ A. An experimental calibration of the temperature sensor was carried out in the range from 77 to 373 K. A blackbody model with a temperature of 800 K was used as a radiation source. Electrical circuits of the sensor and signal recorder for photodiodes are presented.

Keywords: *Stand, optical thermostat, temperature sensor, photodetector, current sensitivity*

For citation: Gavrushko V. V., Grigoriev A. N., Kadriev O. R. Stand for studying the temperature dependence of the integral current sensitivity of photodetectors // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 69-75. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).69-75

Введение

Токовая чувствительность является важнейшей характеристикой фотодиодов. Она используется при выборе типа фотоприемника, необходима для проектирования и расчета характеристик оптоэлектронных устройств. В случае неохлаждаемых фотоприемников они, как правило, не термостатируются. В этом случае чрезвычайно важной является температурная зависимость характеристик фотоприемников, прежде всего токовой чувствительности. Особенно это актуально для фотоприемников с узкой запрещенной зоной, для которой предельные рабочие температуры близки к комнатным [1].

Необходимость обеспечивать облучение фотоприемников стабильным световым потоком в широком интервале температур выявила ряд особенностей, связанных с методикой исследования и конструкцией измерительного стенда. В настоящей работе приводится описание апробированного варианта стенда для исследования температурной зависимости интегральной токовой чувствительности фотоприемников.

Стенд для исследования температурной зависимости

При разработке стенда в качестве базовой была использована методика, рекомендованная ГОСТ [2].

Схема установки представлена на рисунке 1. В комплект входили: источник излучения 1 (АЧТ 800 К), модулятор 2 с частотой 800 Гц, исследуемый фотоприемник 3 помещенный в термостат 4 и регистрирующий прибор 5 (усилитель селективный У2-8).

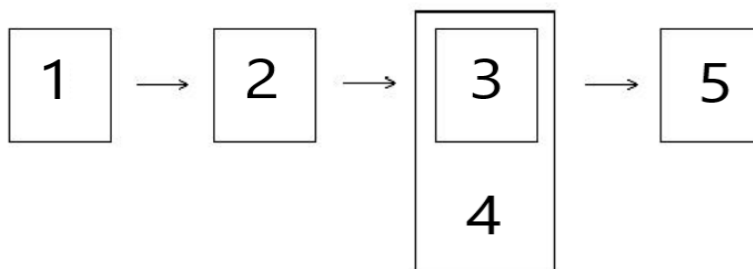


Рисунок 1. Схема измерения интегральной чувствительности фотоприемников: 1. источник излучения (АЧТ 800К), 2. модулятор, 3. исследуемый фотоприемник, 4. термостат, 5. регистрирующий прибор

Для исследования фотоприемников в широкой области температур от 77К до 293К был использован оригинальный оптический термостат [3], схематически показанный на рисунке 2. Внутри сосуда дьюара помещался термостатирующий элемент 3, представляющий собой медный цилиндр, обладающий большой теплоемкостью и высокой теплопроводностью. В цилиндре были сформированы полости для установки термодатчика и фотоприемника.

По оси держателя выполнено сквозное резьбовое отверстие, в которое вворачивается шток 4. Для измерений в области низких температур сосуд дьюара частично заполнялся жидким азотом. В дне корпуса, вблизи образующей внутренней стенки, выполнено одно или несколько отверстий. Нижняя наружная часть корпуса выполнена таким образом, что он плотно (без зазоров) устанавливается в горловую часть сосуда с жидким криоагентом 8. Изменяя глубину погружения штока в азот, можно изменять скорость охлаждения термостатирующего элемента. Такая конструкция криостата позволяла сократить время измерений. При испарении холодный сухой газообразный криоагент поступал через отверстия внутрь корпуса и вытеснял из него теплый (влажный) воздух и тем самым устранял возможность «обмерзания» держателя и установленного на нем исследуемого образца. Пары носителя омывали держатель, что приводило к его дополнительному охлаждению. Конструкция криостата в отличие от классических [4] позволяла исключить влияние окон на характеристики падающего излучения и получить возможность проведения исследований в широком диапазоне температур.

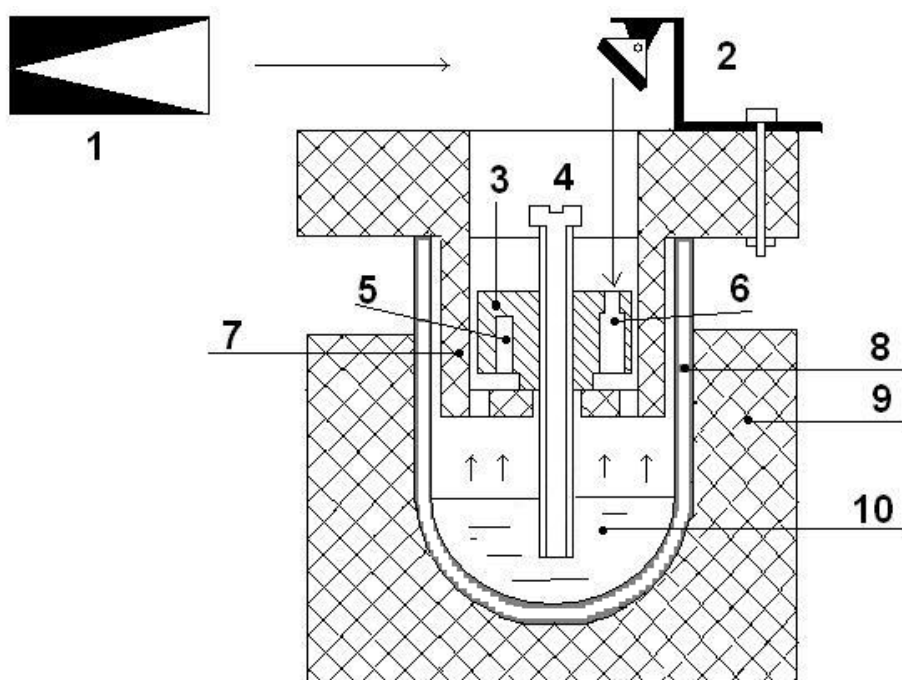


Рисунок 2. Оптический термостат: 1 – АЧТ; 2 – поворотное зеркало; 3 – держатель; 4 – винт; 5 – отверстие для термодатчика; 6 – отверстие для фотодиода; 7 – корпус; 8 – открытый сосуд Дьюара; 9 – подставка; 10 – жидкий азот

Для исследования чувствительности фотоприемников в области температур выше комнатной (от 293K до 323K) был использован тот же самый термостат. Но вместо охлаждения термостатирующий элемент подвергался импульсному нагреву до максимальной температуры. После чего источник тепла удалялся

и производился цикл измерений на проходе температур от максимальной (323 K) до комнатной (293 K). Таким образом предлагаемая конструкция термостата позволяла производить измерения как в области низких, так и высоких температур.

В качестве датчика температуры был использован прямосмещённый эмиттерный переход германиевого транзистора. Физический принцип работы полупроводникового термометра основан на зависимости от температуры падения напряжения на р-п переходе, смещенном в прямом направлении. Данная зависимость близка к линейной, что позволяет использовать датчики без сложных схем коррекции [5-7]. Их использование имеет преимущество перед обычно применяемыми для этих целей термопарами. Датчик характеризуется малыми размерами, высокой чувствительностью и хорошей линейностью температурной характеристики. Кроме того, не требуется контролировать температуру наружных концов термопары. В соответствии с работой [5] напряжение на прямосмещённом р-п переходе при неизменном токе связано с температурой по линейному закону:

$$T = B - AV, \quad (1)$$

где A и B – экспериментально определяемые константы.

Принципиальная электрическая схема термодатчика представлена на рисунке 3: через резистор $R1$ задавался ток эмиттерного переход и точным вольтметром V производилось измерение напряжения на этом переходе. Для градуировки датчика температуры были использованы следующие реперные точки: температура жидкого азота (77,4 K), температура таяния льда (273 K), комнатная температура (измерялась аттестованным термометром ТЛ-1, имеющим погрешность измерения $\pm 0,5$ K) и температура кипения воды (373 K).

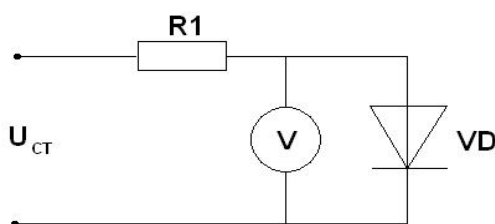


Рисунок 3. Принципиальная электрическая схема термодатчика

Зависимость напряжения на р-п переходе от температуры при токе 100 мкА приведена на рисунке 4. Как видно, эта зависимость линейна в интервале исследованных температур. Мощность, рассеиваемая датчиком, не превышала 70 мкВт, что при хорошем тепловом контакте с держателем практически не вносило погрешности в измерение температуры.

Измерения производились на проходе при медленном остывании криостата. На скорость остывания основное влияние оказывали два фактора:

- количество залитого в криостат жидкого азота;
- число отверстий для паров азота в днище корпуса.

И то, и другое устанавливалось опытным путём. Время остывания до температуры жидкого азота составляло около 2 часов (скорость равна примерно 2 градусам в минуту). Время измерения – около 1,5 минуты, следовательно, точность поддержания температуры во время эксперимента была не хуже 3 К.

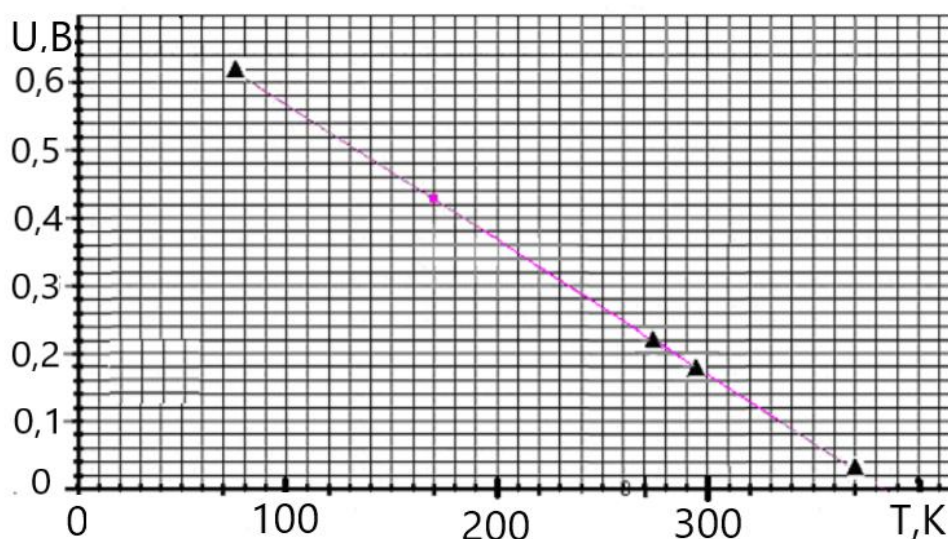


Рисунок 4. Зависимость показаний датчика от температуры

С целью обеспечения режима «короткого замыкания» при измерении токовой чувствительности во всем температурном диапазоне фотодиод подключался к входу трансимпедансного усилителя, схема которого приведённая на рисунке 5.

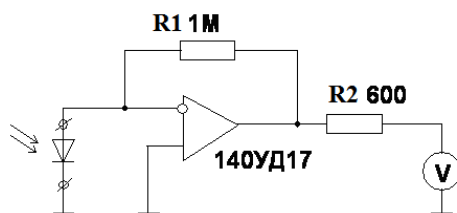


Рисунок 5. Измерительная схема

Заключение

Разработанный стенд позволял измерять интегральную токовую чувствительность фотодиодов в широком интервале температур от 77 до 370 К. Существенным преимуществом стенда является отсутствие входных окон

и необходимости учета связанных с ними оптических потерь. Стенд применялся для исследования характеристик фотодиодов, однако может быть использован при изменении регистрирующего устройства и для других типов фотоприемников.

Список литературы

1. Амбозьяк А. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов / перевод с польского Н. И. Тюшкевича; под редакцией Б. Т. Коломийца. Москва: Советское Радио, 1970. 392 с.
2. ГОСТ 17772–88. СТ СЭВ 3789-82. Приёмники излучения и устройства приёмные полупроводниковые фотоэлектрические: методы измерения фотоэлектрических параметров и определение характеристик: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.06.88 № 2513: дата введения 01.07.89. Москва: Издательство стандартов, 1988. 65 с.
3. Григорьев А. Н., Сапожников А. А. Патент № 2486480 Российская Федерация МПК G01J1/02 (2006.01). Оптический криостат: № 2011149954/28: заявл. 12.07.2011: опубл. 27.06.2013 / заявитель «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».
4. Захаренко В. А., Шкаев А. Г. Патент № 2210099 Российская Федерация МПК G05D 23/30 (2006.01), G01J 5/08 (2006.01). Устройство термостатирования фотоприемника: № 2001116288/09: заявл. 13.06.2001: опубл. 10.08.2003 / заявитель Омский государственный технический университет.
5. Зеленов Г. Я. Измерение температуры р-п-переходом // Современная электроника. 2007. 2. 38-39.
6. Громов В. С., Шестимеров С. М., Увайсов С. Г. Высокоточный транзисторный датчик температуры // Датчики и системы. 2010. 11. 19-22.
7. Булкин П. С., Васильева О. Н, Киров С. А., Малова Т. И. Измерение температуры полупроводниковыми термометрами: лабораторный практикум по молекулярной физике: задача № 224. Москва: ООП Физ. факультета МГУ, 2012. 17 с.

References

1. Ambozyak A. Konstruktsiya i tekhnologiya poluprovodnikovyykh fotoelektricheskikh priborov [Design and technology of semiconductor photoelectric devices] / translated from Polish by N. I. Tyushkevich; edited by B. T. Kolomiets. Moscow: Sov. Radio, 1970. 392 p.
2. GOST 17772–88. ST SEV 3789-82. Priyomniki izlucheniya i ustroystva priyomnyye poluprovodnikovyye fotoelektricheskiye: metody izmereniya fotoelektricheskikh parametrov i opredeleniye kharakteristik: izdaniye ofitsial'noye [Radiation receivers and semiconductor photoelectric receiving devices. Methods for measuring photoelectric parameters and determining characteristics: official publication]: approved and put into effect by Resolution of the USSR State Committee for Standards dated 29.06.88 No. 2513: date of implementation 01.07.89. Moscow: Standards Publishing House., 1988. 65 p.
3. Grigoriev A. N., Sapozhnikov A. A. Patent No. 2486480 Russian Federation IPC G01J1/02 (2006.01). Opticheskiy kriostat [Optical cryostat]: No. 2011149954/28: application 12.07.2011: publ. 27.06.2013 / applicant «Yaroslav-the-Wise Novgorod State University».

4. Zakharenko V. A., Shkaev A. G. Patent No. 2210099 Russian Federation IPC G05D 23/30 (2006.01), G01J 5/08 (2006.01). Ustroystvo termostatirovaniya fotopriyemnika [Thermal control device for photodetector]: No. 2001116288/09: application 13.06.2001: publ. 10.08.2003 / applicant Omsk State Technical University.
5. Zelenov G. Ya. Izmereniye temperatury p-n-perekhodom [Temperature measurement by p-n junction] // Modern electronics. 2007. 2. 38-39.
6. Gromov B. S., Shestimerov S. M., Uvaysov S. G. Vysokotochnyy tranzistornyy datchik temperatury [High precision transistor temperature sensor] // Sensors and systems. 2010. 11. 19-22.
7. Bulkin P. S., Vasilyeva O. N., Kirov S. A., Malova T. I. Izmereniye temperatury poluprovodnikovymi termometrami: laboratornyy praktikum po molekulyarnoy fizike: zadacha № 224 [Temperature measurement with semiconductor thermometers: laboratory workshop on molecular physics: problem No. 224]. Moscow: basic educational program of Faculty of Physics, Moscow State University, 2012. 17 p.

Информация об авторах

Гаверушко Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8704-6751, Valery.Gavrushko@novsu.ru

Григорьев Александр Николаевич – заместитель генерального директора, ООО «Промышленные дроссели» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-7073-8762, a.grigoryev@promdros.ru

Кадриев Олег Равильевич – ассистент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0004-2875-010, olegovichok@mail.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.86

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

ГРНТИ 29.35.19

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ЛУЧЕВОЙ ЭРОЗИИ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ: ОБЗОР

Евстигнеев Д. А., Корнышев Н. П.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация. В рамках исследования выполнен обзор существующих технологий модификации карбида кремния для последующего применения при создании устройств в радиотехнике, телекоммуникационном оборудовании. Приведены основные преимущества карбида кремния ввиду его свойств, новые методы его обработки с учетом влияния фазового состава атмосферы, приведена физико-математическая модель лазерной размерной модификации кристаллов карбида кремния, приведена новая методика проведения процесса регенерации эрозионных следов лучевой природы в кристаллах карбида кремния в жидкой среде, а также разработаны практические рекомендации по реализации метода лазерной размерной модификации кристаллов карбида, отличающиеся структурно-техническими решениями в рамках автоматизированной технологии создания меза-планарного дизайна с элементами ограничения кондуктивных связей микросистем, основанными на реализации лучевой эрозии в газовой и жидкой среде, а также управляемого процесса регенерации эрозионных следов.

Ключевые слова: *карбид кремния, лучевая эрозия, фазовый состав атмосферы, эрозионные следы, меза-планарный дизайн*

Для цитирования: Евстигнеев Д. А., Корнышев Н. П. Исследование модификации карбида кремния методами лучевой эрозии в условиях фазового состава атмосферы: обзор // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 76-94. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

Research Article

STUDY OF THE SILICON CARBIDE MODIFICATION BY RADIATION EROSION METHODS IN THE CONTEXT OF THE ATMOSPHERE PHASE COMPOSITION: A REVIEW

Evstigneev D. A., Kornyshev N. P.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract. As part of the study, a review of existing technologies for modifying silicon carbide for subsequent use when creating devices in radio engineering and telecommunications equipment was carried out. The main advantages of silicon carbide due to its properties, new methods of its processing taking the influence of the atmosphere phase composition into account are given, a physical and mathematical model of laser dimensional modification of silicon carbide crystals is given, a new technique for carrying out the regeneration process of erosion traces of radiation nature in silicon carbide crystals in a liquid medium is given, and also practical recommendations have been developed for the implementation of the method of laser dimensional modification of carbide crystals, distinguished by structural and technical solutions within the framework of automated technology for creating a mesa-planar design with elements of limiting the conductive connections of microsystems, based on the radiation erosion implementation in a gas and liquid environment, as well as a controlled regeneration process of erosion traces.

Keywords: *silicon carbide, radiation erosion, atmosphere phase composition, erosion traces, mesa-planar design*

For citation: Evstigneev D. A., Kornyshev N. P. Study of the silicon carbide modification by radiation erosion methods in the context of the atmosphere phase composition: a review // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 76-94. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).76-94

Введение

Как известно, эффективная и устойчивая работа радиоэлектронных устройств, работающих в экстремальных условиях эксплуатации (повышенные температуры, наличие радиации, воздействие химически агрессивных сред и др.) существенно зависит от быстродействия, энергосбережения и надежности используемой элементной базы в качестве основы для приборов радиоэлектроники. Без учета этих требований востребованность приборов на традиционной элементной базе может оказаться на низком уровне [1].

Одним из наиболее перспективных материалов, представляющий как научный, так и практический интерес для радиофизики является карбид кремния (SiC), в связи с его уникальными диэлектрическими, полупроводниковыми и механическими свойствами, такими как: большая ширина запрещенной зоны, радиационная стойкость, высокая термическая стабильность, химическая стойкость, явление политипизма, карбид кремния нашел применение в силовой электронике, оптических системах, в СВЧ технике, в микроэлектронике и микросенсорах в том числе, используемых в экстремальных условиях эксплуатации. Он широко используется в радиочастотной электронике, микроэлектромеханических системах (MEMS) и мощных полупроводниковых приборах. Модификация кристаллической структуры SiC методами лучевой эрозии в различных средах является важной техникой, позволяющей управлять его свойствами с точностью на наномасштабе [2].

Несмотря на обширные исследования в этой области, остаются вопросы о влиянии различных параметров процесса лучевой эрозии на свойства SiC и его применения в радиофизике. Проведение систематических исследований по модификации SiC в различных средах при помощи лучевой эрозии имеет важное значение для дальнейшего развития радиочастотной электроники и полупроводниковых приборов.

Стоит отметить, что модификация кристаллов карбида кремния достаточно сложный и трудоемкий процесс. Высокая стоимость исходного материала, большое количество отходов, плохая воспроизводимость, все это влияет на конечную стоимость продукции на основе карбида кремния. В качестве предлагаемых методов размерной обработки кристаллов карбида кремния значительный интерес представляют эрозионные методы. Лучевая эрозия имеет ряд преимуществ перед электрической, в частности управляемость процесса и независимость от наличия окружающей среды [3].

Последние исследования в области обработки кристаллов карбида кремния методом лучевой эрозии показывают эффективность создания локальных морфологических и структурных модификаций, в том числе возможность удаления нанослоев и наноструктурирования поверхности [4]. Ввиду малоизученности и недостаточной освещенности вопросов влияния процессов модификации кристаллов карбида кремния лучевой эрозией, в том числе возможность создания сложных микро и нанорельефов, формирования мезапланарного дизайна, а также влияние различных сред при модификации кристаллов возникает потребность в исследовании, нацеленном на адаптацию современных методов микро- и наноразмерной обработки кристаллов карбида кремния с повышением качества получаемых образцов или изделий.

Аналитическая тепловая модель лучевой эрозии карбида кремния

Найдем функцию распределения температуры по поверхности тонкой пластины, обладающей удельной теплоемкостью c и теплопроводностью λ в момент времени $t = t_p$, если коэффициент отражения от ее поверхности составляет $R = 0,9$, а пятно падающего на поверхность материала излучения с постоянной плотностью мощности q имеет форму круга с диаметром D [5].

Будем считать, что пластина настолько велика, что тепловой поток от источника теплоты за время $t = t_p$, не достигает ее краев. В этом случае область исследования может быть выбрана произвольной формы.

Рассмотрим простейший случай, когда теплоемкость и теплопроводность можно принять постоянными и независимыми от температуры:

$$\lambda(T) = \lambda, c(T) = c \text{ и } t_p \ll T_f \quad (1)$$

где T_f – температура начала фазовых превращений в металле. В этом случае поверхностной теплоотдачей можно пренебречь. Тогда с учетом этих допущений дифференциальное уравнение теплопроводности можно представить в линейном виде:

$$c\gamma \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \lambda \frac{d^2 T}{dy^2} + Q, \quad (2)$$

Рассмотрим решение краевой задачи с краевыми условиями первого рода: $T(x,y,t=0) = T_{i0}$. Для упрощения расчетов область определения искомой непрерывной функции $T(x, y)$ выбирают прямоугольной. Для решения задачи используют равномерную по направлениям осей x и y сетка с шагами h_x и h_y соответственно [5].

Пусть размеры пятна падающего на поверхность металла излучения таковы, что $D < h_x$, $D < h_y$, и оно целиком лежит внутри ячейки с номером i^* , j^* (рисунок 1) [5].

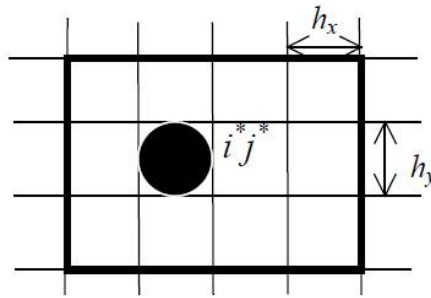


Рисунок 1. Расположение пятна излучения в исследуемой области [6]

Для произвольного внутреннего узла (x, y) вторые производные по координатам аппроксимируются с помощью пятиточечного шаблона:

$$\begin{cases} \frac{d^2 T}{dx^2} |_{t=\tau} \approx \frac{1}{h_x} \left[\frac{T(x+h_x, y) - T(x, y)}{h_x} - \frac{T(x, y) - T(x-h_x, y)}{h_x} \right] |_{t=\tau} = \\ = \frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2}, \\ \frac{d^2 T}{dy^2} |_{t=\tau} \approx \frac{1}{h_y} \left[\frac{T(x+h_x, y) - T(x, y)}{h_y} - \frac{T(x, y) - T(x-h_x, y)}{h_y} \right] |_{t=\tau} = \\ = \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \end{cases}$$

Для аппроксимации производной по времени воспользуемся формулой:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} - T_{ij}^\tau}{\Delta\tau} \quad (3)$$

В этом случае исходное уравнение для произвольного узла ij и момента времени $t = \tau$ примет вид:

$$c_\gamma \gamma \frac{T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} - T_{ij}^\tau}{\Delta\tau} = \lambda \left[\frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \right] + q_{ij}^\tau,$$

$$\text{Где } q_{ij}^\tau = \begin{cases} \frac{(1-R)\rho\Delta\tau\pi D^2}{4}, & \text{при } i, j = i^*, j^*, \\ 0 & \text{при } i, j \neq i^*, j^*. \end{cases}$$

Данное уравнение можно представить в виде:

$$\begin{aligned} T_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = T_{ij}^\tau + \frac{\lambda\Delta\tau}{c_\gamma\gamma} \left[\frac{T_{i+1,j}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i-1,j}^\tau}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^\tau - 2T_{ij}^\tau - T_{i,j-1}^\tau}{h_y^2} \right] \\ + \frac{\Delta\tau}{c_\gamma\gamma} q_{ij}^\tau. \end{aligned}$$

Прямолинейные границы области позволяют точно аппроксимировать краевые условия:

$$T_{ij}^{\text{rp}} = T_{ij}^0 \quad (4)$$

В случае, если заданы лишь начальные условия, для решения полученной системы уравнений потребуется доопределить значения температур. В простейшем случае можно воспользоваться формулами нелинейной интерполяции. Иногда при больших градиентах температуры вместо уменьшения шага h приходится использовать формулы интерполирования более высоких порядков. Система (3), граничные условия (4) содержат все необходимое для решения поставленной задачи. Найдем зависимость изменения температуры от времени в точке на поверхности подложки карбида кремния, удаленной на расстояние $R = 24$ мм от точки действия непрерывного источника постоянной интенсивности ($q = \text{const}$).

Расчет проводится для карбида кремния со следующими параметрами:

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 4,8$ Вт/(см*К);
- объемная теплоемкость $C_V = 27,25$ Дж/(см³ · град);
- коэффициент температуропроводности $a = 0,1934$ см²/с.

Для ведения расчета численным методом выберем шаг квантования по времени $\tau = 4$ нс, а шаги дискретизации по пространству: $h_x = h_y = 20$ мкм.

Процесс изменения температуры в точке, удаленной от точечного источника интенсивности q на расстояние R можно описать следующим аналитическим выражением:

$$T(R, t) = \frac{q}{2\pi\lambda R} \left[1 - \Phi \left(\frac{R}{\sqrt{4at}} \right) \right] \quad (5)$$

где Φ – функция интеграла вероятности [5].

Примем $q = 0,1$ мДж. Полученные аналитические значения температуры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные данные при расчете температурных полей

t, с	1	2	3	4	5
T, С	2438	2511	2547	2572	2593

Обзор существующих методов модификации карбида кремния

Физико-технологические основы модификации кристаллов карбида кремния.

Проведены экспериментальные исследования физических свойств дискретных эрозионных следов в кристаллах карбида кремния. Приведена методика исследования лазерной стойкости карбида кремния через газовую среду.

Воздействие на образцы из карбида кремния осуществляли в импульсно-периодическом режиме на технологической установке LPKF ProtoLaserU3

оснащенной: ИАГ- лазером с длиной волны излучения 355нм. Основные технические характеристики установки LPKF ProtoLaserU3 указаны в таблице 2 [6-7].

Таблица 2. Технические характеристики установки LPKF ProtoLaserU3

Мощность лазера	6Вт
Диаметр луча в фокусе	15μм
Разрешение в поле сканирования	2 μм ± 0,08мкм
Воспроизводимость	±2 μм ± 0,08мкм
Частота лазерных импульсов	25-200кГц

Проведены исследования пороговых значений плотности энергии лазерного излучения производились экспериментально на установке LPKF ProtoLaserU3 на монокристаллах карбида кремния с естественными (ростовыми) гранями (0001) политипов 6Н, 15R. Модификация осуществлялась точечным излучением с частотой 100кГц мощность и скорость реза подбирались экспериментально. Топологический рисунок на поверхности кристалла представлял собой несколько трасс, прорезанных по кристаллографическим направлениям $[11\bar{2}0]$ и $[\bar{1}0\bar{1}0]$ горизонтально и под углом 45°.

Экспериментально разработан метод модификации кристаллов карбида кремния позволяющий в рамках имеющихся технологий создавать эрозионные следы различных конфигураций.

Подавляющее большинство лазерных технологий, используемых в приборостроении, основано на быстром нагреве обрабатываемого материала сфокусированным излучением до высоких температур и его дальнейшем плавлении или испарении. Несмотря на локальность воздействия, при обработке хрупких материалов это зачастую влечет за собой реструктуризацию обрабатываемого материала и возникновение в окрестностях зоны обработки оплавленных участков или микротрещин. При переходе к более коротким импульсам излучения (10–8—10–14 с) и сверхвысокой интенсивности (10¹⁰–10¹⁴ Вт/см²) физическая картина взаимодействия излучения с обрабатываемым материалом значительно изменяется. Влияние температуры перестает быть определяющим, и основную роль в механизме разрушения вещества начинают играть процессы непосредственного перехода энергии из возбужденных состояний. В основе взаимодействия излучения с веществом лежит механизм так называемого кулоновского взрыва, сопровождающегося образованием поверхностного облака плазмы.

В работе [1] керамика карбида кремния (SiC) полировалась с помощью высокочастотного фемтосекундного лазера (fs-лазера). Влияние различных углов падения лазера на обрабатываемую поверхность было подробно исследовано, а морфология обработки для различных параметров лазерной обработки была проанализирована и оптимизирована. Теоретическое моделирование

и экспериментальные результаты показали, что исходные поверхностные дефекты ямок до обработки поверхности SiC заметно влияют на эффект абляции. При полировке fs-лазером при вертикальном падении в ямках возникал эффект захвата света за счет многократных отражений, что усиливало поглощение лазерной энергии и увеличивало размер ямок. Небольшой угол падения позволяет устранить эффекты захвата света в ямках и получить гладкую поверхность материала. Кроме того, степень окисления и графитизации существенно уменьшаются с уменьшением угла падения. Получено оптимальное сочетание параметров обработки при угле падения 10° , частоте лазера 100 кГц, скорости сканирования 200 мм/с, энергии одиночного импульса 60 мкДж. Полированная SiC-керамика имела гладкую, плоскую поверхность без ямок со средним значением Sa 0,187 мкм и Sz 2,313 мкм. Наконец, было подробно объяснено образование типичных особенностей, таких как ямки, отложения частиц и мусора. Работа предоставляет новые исследовательские идеи для понимания механизмов полировки, связанных с удалением поверхностных дефектов и отложений из керамики SiC.

Известны способы обработки ультрафиолетовым лазерным излучением поверхности карбида кремния в воде, прошедшей этап очистки в системе обратного осмоса, в этаноле [3, 8]. Наноструктурирование карбида кремния с помощью лазерной абляции, например, в этаноле с использованием метода двойной экспозиции позволит изменить его оптические свойства. Вид поверхности 3H-SiC после первой экспозиции с помощью фемтосекундных лазерных импульсов в этаноле представлен на рисунке 2.

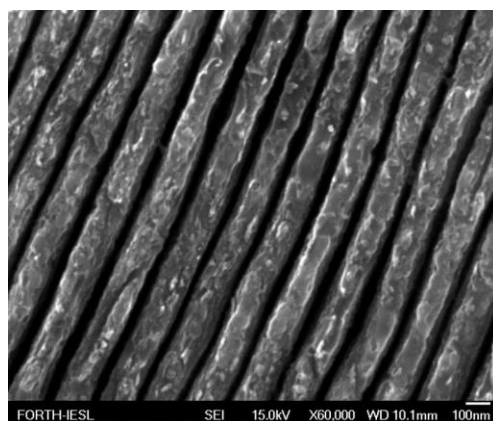


Рисунок 2. Морфология поверхности кремния после воздействия излучения Ti:sapphire лазера с длиной волны 800 нм и длительностью импульса 210 фс в этаноле (первая экспозиция). Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени 1,4 Дж/см². Масштабная метка 1 мкм

Анализ морфологии показывает, что образование однородных поверхностно-периодических структур с периодом около 150 нм, это результат воздействия фемтосекундных лазерных импульсов. Заметно и формирование самоорганизующихся наноструктур со средним поперечным размером 10-30 нм,

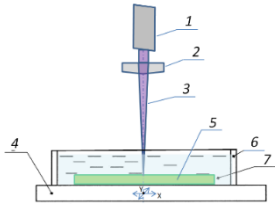
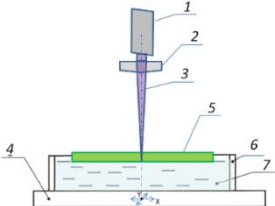
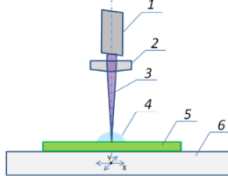
но они нерегулярны и плотность их мала. Плоскость поляризации лазерного излучения перпендикулярна ориентации структур. Формирование такого рельефа на карбиде кремния при его абляции фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны излучения 800 нм в жидкости может быть обусловлено двухфотонным возбуждением лазерным излучением электронов карбида кремния. Ширина запрещенной зоны 3H-SiC равна 3,2 эВ, при этом энергия кванта лазерного излучения соответствует 1,55 эВ. При комнатной температуре концентрация электронов в зоне проводимости SiC мала, поэтому карбид кремния является диэлектриком. Из-за этого поверхностная электромагнитная волна не может распространяться по поверхности исходного материала. Однако, при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на поверхность мишени может происходить двухфотонное возбуждение электронов валентной зоны карбида кремния. Электроны переходят в зону проводимости, поверхность карбида кремния металлизирована. Вследствие этого поверхностная электромагнитная волна распространится по поверхности, в результате различных термических процессов (испарение, плавление, сублимация и. т. д.), на образце образуются наноструктуры. Их профиль носит несинусоидальный характер. Края (в поперечном направлении) имеют резкую границу, а не сглаженную. Это может быть связано с нелинейностью двухфотонного поглощения. Можно предположить, что сублимация поверхности происходит только на тех участках образца, где достигнут порог двухфотонного поглощения [9].

Данный способ является низкоуниверсальным, заключающимся в получении морфологии поверхности только определенного диапазона, а также присутствуют сложности технологического процесса очистки рабочей жидкости, исключающего использования других жидких сред.

В работе, посвященной исследованию воздействия лазерного излучения на обработку карбида кремния в кювете с рабочей жидкостью, исследуемые образцы карбида кремния частично погружались в рабочую жидкость, в качестве которой использовался раствор КОН. Обработка тыльной поверхности карбида кремния, соприкасающейся с рабочей жидкостью, осуществлялась через слой карбида кремния лазерным излучением 600 нм, длительностью импульса 100 нс, с частотой 50 кГц и мощностью 4 Вт. Локальный нагрев кристалла, одновременным действием парных источников теплового потока на фронтальной и тыльной поверхностях карбида кремния в условиях прямого контакта тыльной поверхности кристалла с химически активной по отношению к карбиду кремния рабочей жидкостью, порождает процесс химической эрозии поверхности кристалла и формирует новый тип морфологии с наноразмерными структурами. При этом продукты эрозии удалялись при взаимодействии с химически активной рабочей жидкостью. Полученная морфология поверхности использовалась для получения светодиодов на карбиде кремния [4, 10].

В таблице 3 описаны разработанные и запатентованные методы локальной лучевой эрозии карбида кремния тремя способами [11].

Таблица 3. Базовые варианты метода

№	Структурная схема	Название
1		Метод полного погружения кристалла в жидкость 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – позиционер; 5 – кристалл SiC; 6 – кювета; 7 – рабочая жидкость.
2		Метод флотации кристалла 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – позиционер; 5 – кристалл SiC; 6 – кювета; 7 – рабочая жидкость.
3		Метод жидкой линзы 1 – лазер; 2 – фокусирующая линза; 3 – пучок лазерного излучения; 4 – жидкая линза; 5 – кристалл SiC; 6 – позиционер.

В таблице 4 представлены рабочие жидкости для экспериментальных исследований. Использовали как деионизованную воду, так и более вязкие жидкости, в том числе кислоты, щелочи и криожидкости. Результаты показали различную морфологию поверхности, отличающуюся как шероховатостью, так и трещинообразованием.

Различные методы размерной модификации, исследованные в работе, показали практическое применение для получения модифицированных поверхностей с минимизацией профиля шероховатости. Взаимодействие лазера с веществом представляет собой сложный процесс в небольших масштабах. В зоне воздействия лазера появляются различные особенности аблированной поверхности, на которые влияют такие параметры процесса, как длительность импульса, длина волны лазера и плотность энергии. Эти особенности отражают ряд основных механизмов взаимодействия, включая аморфизацию, плавление, термический/нетепловой фазовый переход, кулоновский взрыв, испарение и т. д.

Таблица 4. Рабочие жидкости

№	Вид	Особенности
Нейтральные		
1	Деионизованная вода	Химически инертна, оптически прозрачна, текучесть, высокая теплоемкость
2	Вакуумное масло	Химически инертна, оптически полупрозрачна, вязкая жидкость, стойкость к излучению высокая теплоемкость
3	Силиконовые жидкости	Химически инертна, оптически прозрачна, вязкая жидкость, низкая теплоемкость
Хим. активные		
4	Щелочи	Химически активна, текучесть, оптически не прозрачна, сильное взаимодействие при нагреве до температуры 500-600 °C
5	Кислоты	Химически активна, текучесть, оптически прозрачна, сильное взаимодействие при нагреве до температуры 500-600 °C
Криогенные		
6	Азот	Оптически прозрачен, крайне текуч, постоянно испаряется при комнатной температуре, химически инертен, применяется для охлаждения кристаллов

Было проведено множество работ для исследования этих фундаментальных проблем как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Например, методы атомно-силовой микроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии были использованы [12] для изучения влияния лазерного облучения на морфологию поверхности и химический состав SiC в условиях воздуха. На поверхности был обнаружен наноструктурированный столбчатый слой на основе кремнезема, а между объемным и оксидным слоем обнаружен слой графита толщиной в несколько нанометров.

Исследование эрозионной стойкости кристаллов SiC методом дискретных трасс

В данном исследовании оценивается эрозионная стойкость кристаллов карбида кремния путём анализа дискретных трасс эрозии. Через экспериментальное моделирование воздействия абразивных частиц исследуются топографические и химические изменения на поверхности SiC. Результаты могут пролить свет на фундаментальные процессы, определяющие устойчивость материала к эрозии, что имеет важное значение для его применения в условиях экстремальных нагрузок. На рисунке 3 представлены экспериментальные эрозионные следы по определенным кристаллографическим направлениям.

В рамках исследования проведена серия экспериментов с целью выявления корреляции между мощностью лазерного излучения и шириной обработанной трассы на кристаллах SiC (рисунки 4–6). Методика включает в себя пошаговое увеличение мощности лазера и измерение получаемых трасс при каждом шаге.

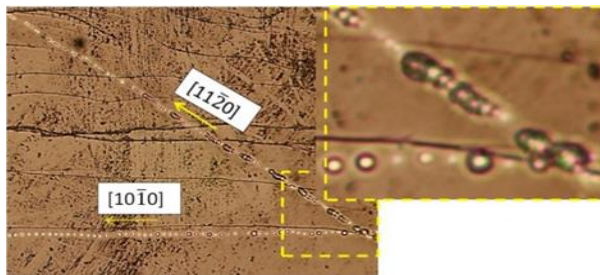


Рисунок 3. К методике оценки эрозионной стойкости. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями 15R-SiC<N>, грань (0001) C

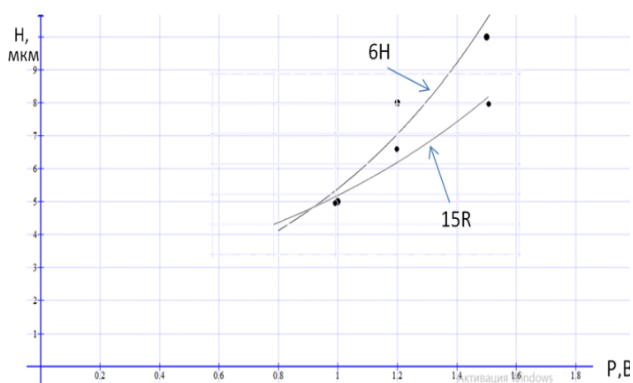


Рисунок 4. Зависимость ширины трассы от мощности лазерного излучения. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями SiC<N>, грань (0001) C

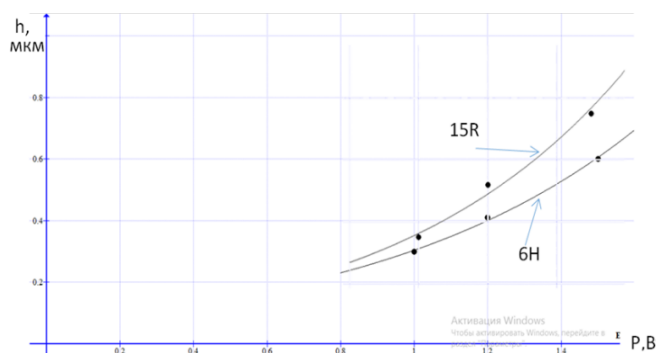


Рисунок 5. Зависимость глубины трассы от мощности лазерного излучения. Эксперимент. Пластинчатый монокристалл с естественными гранями SiC<N>, грань (0001) C

Данные позволяют определить энергетические пороги для начала фазовых превращений в SiC и перехода от поверхностного воздействия к объемной модификации. Это исследование существенно влияет на разработку процессов лазерной обработки для прецизионного микро- и наноструктурирования карбида кремния.

Получены графики зависимостей (рисунок 7) сопротивления от проводимости дискретных трасс, сформированных на изоляторе карбида кремния с объемным сопротивлением $R = 1\sim 2$ ГОм.

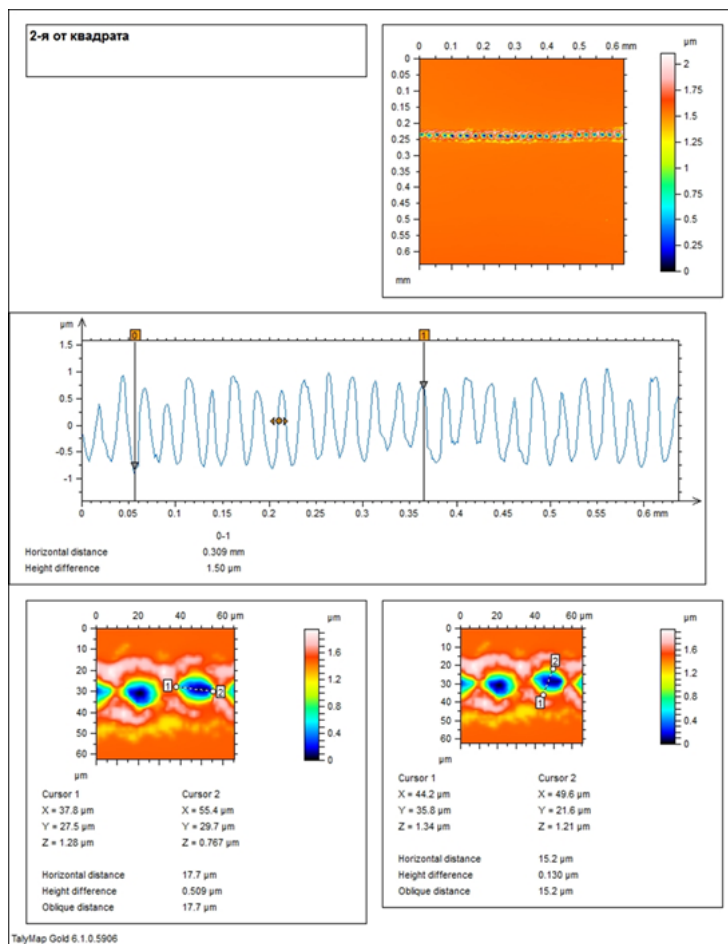


Рисунок 6. Измерение геометрических характеристик трассы. Пример. Эксперимент. Пластиновый монокристалл с естественными гранями 6Н- SiC<N>, грань (0001) C

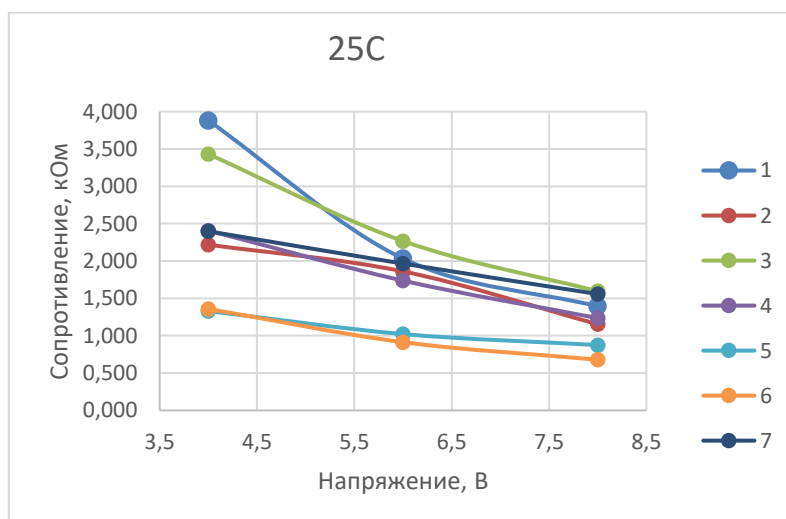


Рисунок 7. Графики зависимостей сопротивления дискретных трасс, выполненных на подложке карбида кремния с объемным сопротивлением $R = 1\sim 2$ ГОм

Показано, что трассы имеют сопротивление меньшее, чем сама подложка. В зависимости от интервала лунок на каждой трассе при коэффициенте связности от $C = 0,2$, соответствующий трассе номер 1 до $C = 1,8$, соответствующий трассе номер 7, при комнатной температуре значение сопротивления варьируется от 600 Ом при интервале внахлест до единиц кОм в интервале 10-20 мкм. Данный эффект наблюдается вследствие выплескивания кремниевой фазы в виде наноструктурированных частиц.

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через воду

В экспериментах по лазерной абляции через воду исследуется влияние водной среды на процесс абляции карбида кремния. Модификации поверхности SiC при воздействии лазера через слой воды может снизить тепловое повреждение и повысить точность обработки. При этом возникают локальные эффекты испарения жидкости, быстрое охлаждение карбида кремния и образование наноструктур, связанных с лункой, состоящих преимущественно из кремниевой фазы (рисунки 8-10).

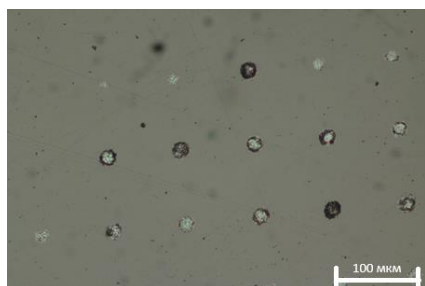


Рисунок 8. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р=3,5 Вт

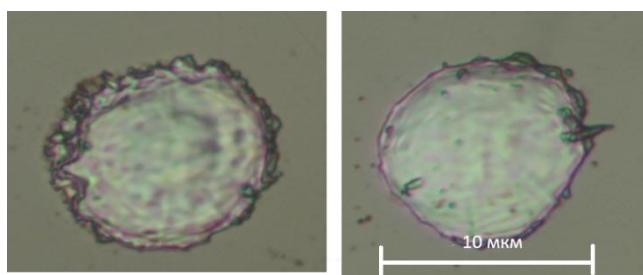


Рисунок 9. Примеры следов. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р =3,5Вт

Применение лазерной абляции твёрдых материалов в жидкой среде открывает возможности для генерации наноструктур, лишённых примесей и ионных загрязнений. В контрасте с абляцией, проводимой в газовой атмосфере, которая зачастую сопровождается окислением поверхности и формированием нестехиометричного состава, процесс в жидкости сохраняет исходный химический состав обрабатываемого материала. Данный эффект достигается благодаря созданию высокого давления пара вокруг зоны лазерного воздействия в жидкости, что обеспечивает эффективное удаление различных агентов с поверхности исследуемого образца.

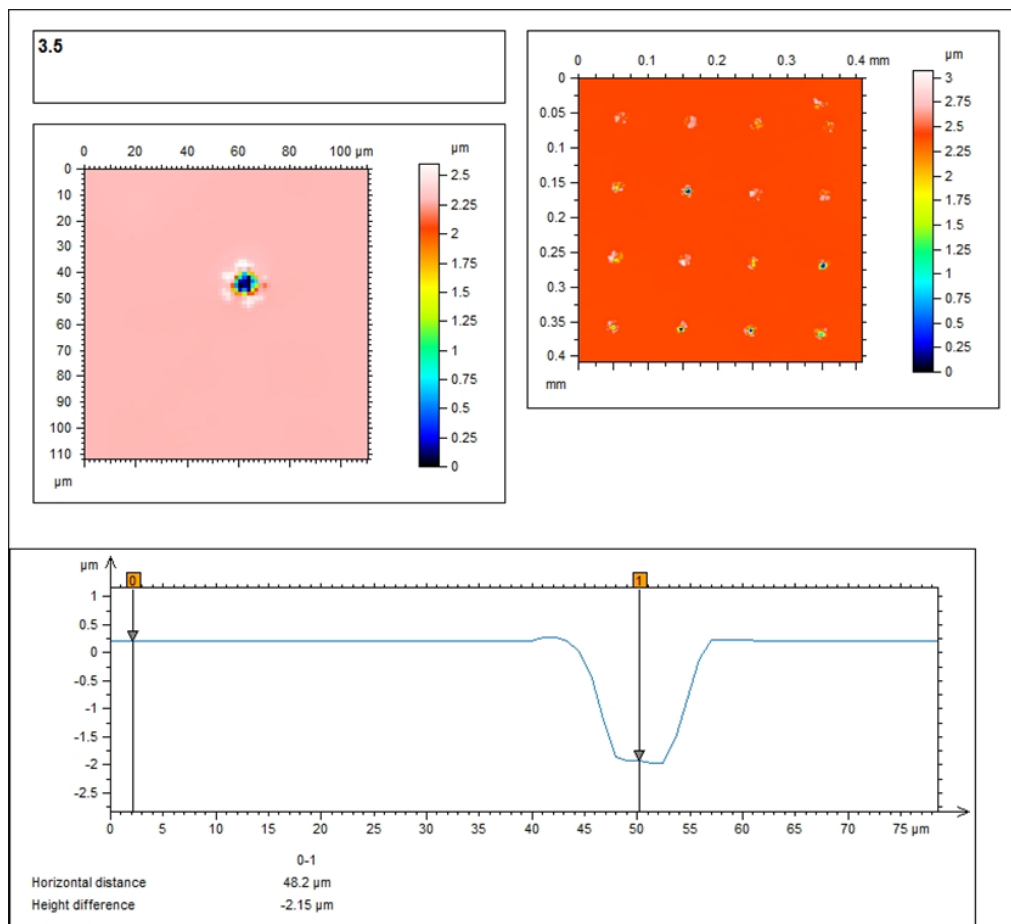


Рисунок 10. Исследование структуры решетки методом профилометрии. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001) Si, деионизованная вода, мощность ЛИ Р = 3,5 Вт

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через вакуумное масло

Отличительной особенностью лазерной абляции карбида кремния через вакуумное масло является более высокая теплопроводность и вязкость масла, что способствует более равномерному рассеиванию тепла и снижению теплового воздействия на окружающие участки материала. Вакуумное масло обладает уникальными свойствами, позволяющими контролировать процесс абляции с большей точностью, минимизируя риск термического повреждения и предотвращая быстрое испарение жидкости в момент лазерного воздействия (рисунки 11-13).

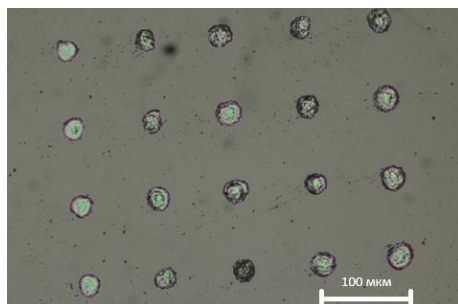


Рисунок 11. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6 Вт

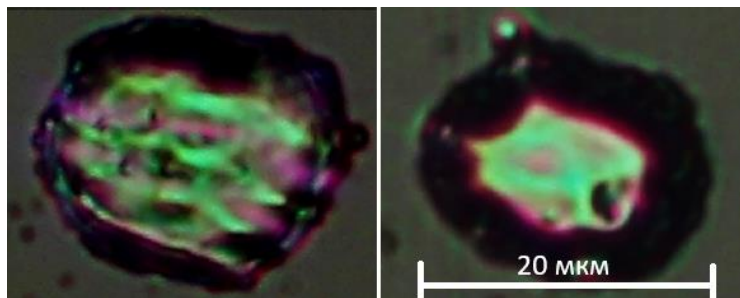


Рисунок 12. Примеры следов. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6 Вт, мощность ЛИ P =6 Вт

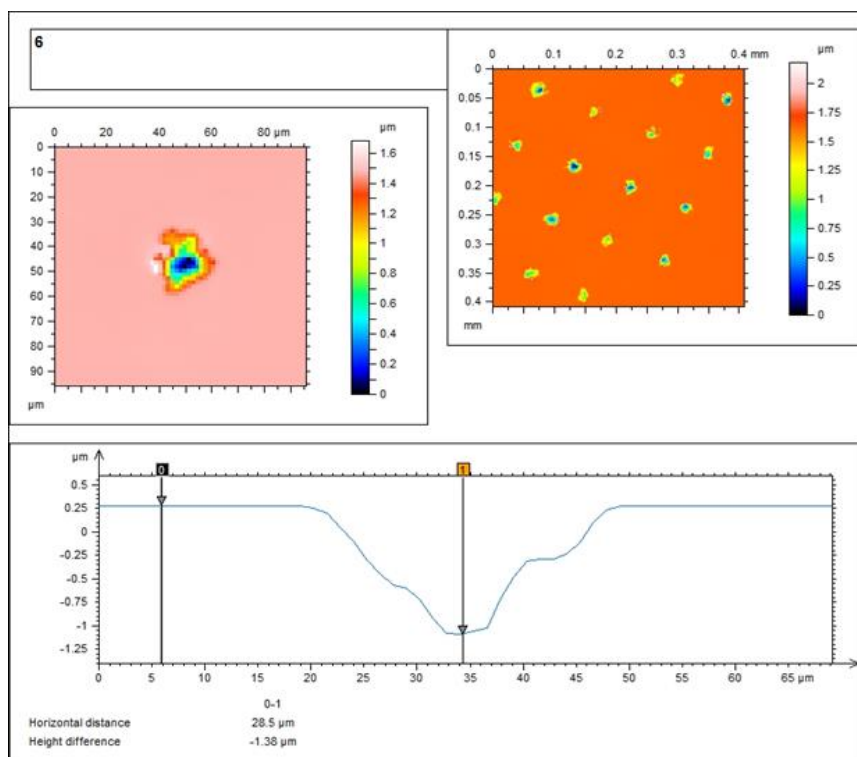


Рисунок 13. Исследование структуры решетки методом профилометрии. Фото. Эксперимент, монокристалл 4Н-SiC<N> грань (0001) Si, вакуумное масло, мощность ЛИ P=6Вт, мощность ЛИ P =6 Вт

Из экспериментальных данных видно, что рассеяние тепла происходит в большем масштабе, чем при экспериментах с водой. Это говорит о том, что воздействие лазерной абляции происходит более щадяще для карбида кремния, однако получать контролируемые структуры заданного размера становиться сложнее,

так как рассеяние тепловой энергии, наличие примесей частиц не позволяет его применять для микро- и наноструктурирования в масштабе трасс.

Локальная лучевая эрозия карбида кремния через силиконовое масло

Эксперименты, связанные с лазерной эрозией через силиконовое масло, прежде всего отличаются своей структурой в наномасштабе (рисунки 14-16). При воздействии лазерного излучения через силиконовое масло возникают оптимальные условия для лазерной обработки, минимизируя тепловое повреждение обрабатываемого материала и предотвращая его окисление или загрязнение. благодаря своим высоким теплопроводным и диэлектрическим характеристикам, а также химической инертности.

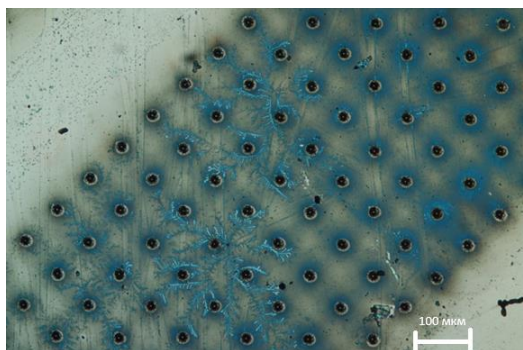


Рисунок 14. Структура решетки. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт



Рисунок 15. Примеры следов с выпуклым фронтом. Фото, 50X. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт

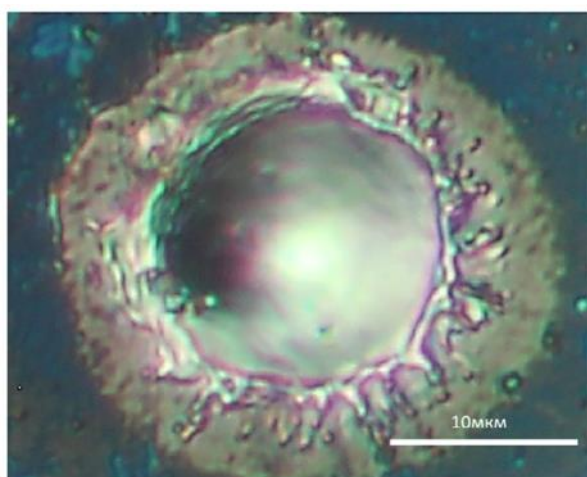


Рисунок 16. Морфология одиночного следа с выпуклым фронтом. Фото. Эксперимент, монокристалл 4H-SiC<N> грань (0001)Si, силиконовое масло, мощность ЛИ P=3,5 Вт

Основные результаты и выводы

Был разработан новый метод размерной модификации кристаллов карбида кремния с использованием лазера, который основывается на анализе ряда ключевых параметров. Эти параметры включают спектральный коэффициент поглощения материала, анизотропию устойчивости к эрозии, пространственную структуру обрабатываемой области, морфологические характеристики поверхности, а также способность к восстановлению после эрозионных процессов. Кроме того, учитывается воздействие состава окружающей атмосферы на процесс абляции, при этом метод адаптирован к условиям ограниченных ресурсов и времени. Метод включает:

- физико-математическую модель лазерной размерной модификации кристаллов карбида кремния, учитывающую особенности поглощения лазерного излучения и обеспечивающую возможность моделирования возникающих температурных полей;
- новую методику лучевой эрозии кристаллов карбида кремния в газовой (воздушной) среде, отличающуюся учетом скорости позиционирования и позволяющую воспроизводимо формировать как одномерную систему эрозионных лунок (трассу) различной связности, так и двумерную в виде решетки;
- новую методику лучевой эрозии кристаллов карбида кремния в жидкой среде, отличающуюся применением частичного погружения кристалла и позволяющую воспроизводимо формировать заполненные расплавом эрозионные лунки, в том числе с выпуклым фронтом;
- новую методику проведения процесса регенерации эрозионных следов лучевой природы в кристаллах карбида кремния в жидкой среде, отличающуюся применением коэффициента формы и позволяющую количественно описывать стадии процесса.

Список литературы

1. Zheng Q., Mei X., Jiang G., Yan Z., Fan Z., Wang W., Pan A., Cui J. Influence of surface morphology and processing parameters on polishing of silicon carbide ceramics using femtosecond laser pulses // *Surfaces and Interface*. 2022. 36(1).102528. DOI: 10.1016/j.surf.2022.102528
2. Карачинов В. А. Получение профилированных монокристаллов карбида кремния методом сублимации и электрической эрозии: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2005. 32 с.
3. Шафеев Г. А., Серков А. А., Бармина Е. В. Патент № 2563324 Российская Федерация, МПК В82У 40/00 (2011.01), Н01L 33/34 (2010.01). Способ обработки поверхности карбида кремния с помощью ультрафиолетового лазерного излучения: № 2013148882/28: заявл. 01.11.2013: опубл. 20.09.2015 / заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Энергомаштехника» (ООО «ЭТМ»).
4. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Karachinov D. A. Multifunctional anemometric microsystem based on silicon carbide // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1047. 12054. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012054

5. Агеев А. О., Беляев Е. А., Болтовец Н. С., Киселев В. С., Кондакова Р. В., Лебедева А. А., Миленин В. В., Охрименко О. Б., Поляков В. В., Светличный А. М., Черениченко Д. И. Карбид кремния: технология, свойства, применение / под общей редакцией А. Е. Беляева, Р. В. Конаковой. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
6. Астапчик С. А., Голубев В. С., Маклаков А. Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск: Белорусская наука, 2008. 251 с.
7. Башта П. Лазерная резка методом LaserMicroJet // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2010. 3(101). 32-35.
8. Ромашевский С. А. Особенности наноструктурирования поверхности кремния в результате ее сверхбыстрого нагрева фемтосекндным лазерным импульсом в воде // Письма в журнал технической физики. 2018. 44(14). 58-64. DOI: 10.21883/PJTF.2018.14.46345.17271
9. Карачинов В. А. Микроострийная шероховатость нарушенных слоев эрозионной природы в кристаллах карбида кремния // Кристаллография. 2004. 49(5). 899-904.
10. Евстигнеев Д. А., Карачинов В. А., Бондарев Д. А., Карачинов Д. В. Патент № 2648306 Российская Федерация, МПК G01P 5/10 (2006.01), G01K 13/02 (2006.01). Тепловая микросистема на полупроводниковой основе: № 2016145722: заявл. 22.11.2016: опубл. 23.03.2018 / заявители Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», ОАО «ОКБ-Планета».
11. Карачинов В. А., Евстигнеев Д. А., Петров А. В., Ионов А. С., Желаннов А. В. Патент № 2 724 142 Российская Федерация, МПК H01L 21/302 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01). Способ модификации поверхности кристаллов карбида кремния: № 2020113237: заявл. 26.03.2020: опубл. 31.03.2021 / заявитель АО «ОКБ-Планета».
12. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Varshavskiy A. S., Manykhin V. A. Modeling the distribution of temperature field within the micro heat - loss anemometer based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012016

References

1. Zheng Q., Mei X., Jiang G., Yan Z., Fan Z., Wang W., Pan A., Cui J. Influence of surface morphology and processing parameters on polishing of silicon carbide ceramics using femtosecond laser pulses // Surfaces and Interface. 2022. 36(1). 102528. DOI: 10.1016/j.surf.2022.102528
2. Karachinov V. A. Preparation of profiled silicon carbide single crystals by sublimation and electrical erosion: abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. St. Petersburg, 2005. 32 p.
3. Shafeev G. A., Serkov A. A., Barmina E. V. Patent No. 2563324 Russian Federation, IPC B82Y 40/00 (2011.01), H01L 33/34 (2010.01). Method for treating the surface of silicon carbide using ultraviolet laser radiation: No. 2013148882/28: application. 11.01.2013: publ. 09.20.2015 / applicant Limited Liability Company "Energomashtekhnika" (LLC "ETM").
4. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Karachinov D. A. Multifunctional anemometric microsystem based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1047. 12054. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012054

5. Ageev A. O., Belyaev E. A., Boltovets N. S., Kiselev V. S., Kondakova R. V., Lebedeva A. A., Milenin V. V., Okhrimenko O. B., Polyakov V.V., Svetlichny A. M., Cherenichenko D. I. Silicon carbide: technology, properties, application / edited by A. E. Belyaev, R. V. Konakova. Kharkov: ISMA, 2010. 532 p.
6. Astapchik S. A., Golubev V. S., Maklakov A. G. Laser technologies in mechanical engineering and metalworking. Minsk: Belarusian Science, 2008. 251 p.
7. Bashta P. Laser cutting using the LaserMicroJet method // Electronics: Science, technology, business. 2010. 3(101). 32-35.
8. Romashevsky S. A. Features of nanostructuring of the silicon surface as a result of its ultrafast heating with a femtosecond laser pulse in water // Letters to the Journal of Technical Physics. 2018. 44(14). 58-64. DOI: 10.21883/PJTF.2018.14.46345.17271
9. Karachinov V. A. Micropoint roughness of disturbed layers of erosive nature in silicon carbide crystals // Crystallography. 2004. 49(5). 899-904.
10. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Bondarev D. A., Karachinov D. V. Patent No. 2648306 Russian Federation, IPC G01P 5/10 (2006.01), G01K 13/02 (2006.01). Thermal microsystem based on semiconductor: No. 2016145722: application. 11/22/2016: publ. 03.23.2018 / applicants Federal budgetary educational institution of higher professional education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University", JSC "OKB-Planeta".
11. Karachinov V. A., Evstigneev D. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Zhelannov A. V. Patent No. 2 724 142 Russian Federation, IPC H01L 21/302 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01). Method for modifying the surface of silicon carbide crystals: No. 2020113237: application. 03.26.2020: publ. 03/31/2021 / applicant JSC "OKB-Planeta".
12. Evstigneev D. A., Karachinov V. A., Varshavskiy A. S., Manykhin V. A. Modeling the distribution of temperature field within the micro heat - loss anemometer based on silicon carbide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 441. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012016

Информация об авторах

Евстигнеев Даниил Алексеевич – преподаватель, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0670-8205, Daniil.Evstigneev@novsu.ru

Корнышев Николай Петрович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-3177-2040, Nikolai.Kornishev@novsu.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.397.13:528.8

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

ГРНТИ 47.51.39+36.23.21

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

О ПРИМЕНЕНИИ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ

Калитов М. А.

АО «Элси» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Обсуждаются вопросы применения спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании Земли, как с помощью спутниковых снимков, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Описывается использование спектрозональных снимков для оценки лесовозобновления, эффективности применения гербицидов, реконструкции археологических памятников, экологического мониторинга поверхности водохранилищ путем мониторинга степени распространения сине-зеленых водорослей, распознавания дорожной сети в лесных хозяйствах. Оценивается целесообразность применения БПЛА для съемки отдельных областей местности вместо получения изображений со спутников. Приводятся результаты повышения информативности мультиспектральных изображений, получаемых при различных вариантах обработки. По результатам аналитического обзора формулируются тенденции развития методов улучшения визуального качества спектрозональных изображений, полученных при мониторинге земной поверхности. Указываются недостатки рассмотренных способов повышения информативности мультиспектральных изображений, предлагаются доработки, которые способны улучшить используемые методы.

Ключевые слова: спектрозональная визуализация, обработка спектрозональных изображений, дистанционное зондирование Земли

Для цитирования: Калитов М. А. О применении спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании земли // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 95-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

Research Article

ABOUT THE APPLICATION OF MULTISPECTRAL VISUALIZATION IN EARTH REMOTE SENSING

Kalitov M. A.

JSC "ELSY" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The issues of using multispectral imaging in remote sensing of the Earth, both using satellite images and using unmanned aerial vehicles (UAVs), are discussed. The use of multispectral images for assessing reforestation, the effectiveness of herbicide use, reconstruction of archaeological sites, environmental monitoring of the surface of reservoirs by monitoring the extent of the spread of blue-green algae, and recognition of the road network in forestry is described. The feasibility of using UAVs to survey individual areas of the terrain instead of obtaining images from satellites is assessed. The results of increasing the information content of multispectral images obtained using various processing options are presented. Based on the results of the analytical review, trends in the development of methods for improving the visual quality of multispectral images obtained during monitoring of the earth's surface are formulated. The disadvantages of the considered methods for increasing the information content of multispectral images are indicated, and improvements are proposed that can improve the methods used.

Keywords: multispectral imaging, multispectral image processing, Earth remote sensing

For citation: Kalitov M. A. About the application of multispectral visualization in earth remote sensing // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 95-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

Введение

Телевизионная спектрозональная визуализация является одной из актуальных и быстро развивающихся областей науки и техники [1]. При визуализации спектрозональных изображений широко применяются методы [2-13] их цифровой обработки. В свою очередь интерес к методам цифровой обработки изображений происходит из двух основных областей ее применения, которыми являются повышение качества изображений для улучшения его визуального восприятия человеком и обработка изображений для их хранения, передачи, представления и извлечения дополнительной визуальной информации [14].

Телевизионная спектрозональная визуализация состоит в наблюдении объекта одновременно в нескольких (минимум в двух) зонах спектра с целью выявления или усиления тех различий между деталями объекта, которые не фиксируются при обычной съёмке в видимых лучах. Указанные зоны выбирают с учётом оптических характеристик объекта и целей съёмки. Причём в одних случаях может потребоваться видеосъёмка в видимой и невидимой частях спектра, в других – в избранных узких зонах видимой его части [15].

Цифровая спектрозональная съёмка стала неотъемлемой частью дистанционного зондирования земной поверхности [16-19]. Известно об обширном перечне практических задач, решаемых с применением изображений, полученных в нескольких спектральных диапазонах наблюдения. К таким задачам относятся, наблюдение за процессом лесовозобновления [20], оценка эффективности применяемых гербицидов [21], идентификация и классификация лесов, почв, болот и др. [22], реконструкция археологических памятников [23], распознавание дорог в лесных хозяйствах [24], мониторинг биомассы в водоемах [25]. Существуют материалы для описания способов, улучшающих информативность и восприятие изображений путем классификации и нейронных сетей [22, 26], повышающих разрешение спектрозональных спутниковых снимков методом слияния [27], повышающих информативность мультиспектральных изображений с использованием текстурного анализа [28].

Целью настоящей статьи является аналитический обзор областей применения спектрозональных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли, оценка эффективности и достоверности существующих методов обработки, определение перспектив развития рассмотренных способов и разработки новых для улучшения качества снимков и получению дополнительной информации из них.

Аналитический обзор

Спектрозональные снимки при дистанционном зондировании Земли нашли широкое применение в организациях, выполняющих надзор за возобновлением

лесных ресурсов [20, 22, 24], отмечается, что подобные системы позволяют различать лиственные и хвойные породы, определять состав молодняков и сухостоев в оставленных куртинах. Потребность в информации об актуальном состоянии лесных дорог, а также отсутствие в открытом доступе их точной координатной привязки в совокупности с труднодоступностью многих территорий приводят к необходимости использования дистанционного зондирования [24]. Причем используются как общедоступные данные от спутников Landsat и Sentinel, так и БПЛА. Ввиду целесообразности съемки с наиболее высоким пространственным разрешением и оперативности наиболее предпочтительными становятся изображения, полученные при помощи БПЛА. Для распознавания дорог в последнее время наиболее информативными признаны комбинации прямых дешифровочных признаков в сочетаниях (яркостные и текстурные, геометрические и яркостные).

Исследование [21] показало, что по спектральнонам снимкам с летательных аппаратов, возможно, обнаруживать области посевов, с большим количеством всходов сорняков. К сожалению, для корректного использования данного метода необходимо обладать набором исходных данных (виды сорняков, питательность среды и т. п.) в противном случае достоверность выводов может быть искажена. В статье [23] утверждают, что спектральнонам снимки, полученные при дистанционном зондировании Земли, могут быть использованы для предварительной оценки наличия культурного слоя.

Мультиспектральные изображения способны отражать актуальную информацию о развитии сине-зеленых водорослей, данное исследование [25] проводилось на примере Куйбышевского водохранилища, где с его помощью были отчетливо визуализированы все стадии от роста, до затухания. Результаты использованных и отраженных авторами в статье [25] методов приведены на рисунках 1-3 и являются следствием вычислений по следующим выражениям (1-3), приведенным в [29].

Известно использование индексов, разработанных непосредственно для водорослей, таких как Floating algae index (FAI) [30], Seaweed Enhancing Index (SEI) [31]. При расчете данных индексов используются специфические спектральные каналы ограниченного использования, которые недоступны для большинства территорий России [25]. Потому подробнее рассмотрим наиболее доступные, а значит общеприменяемые методы.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс), его использование обусловлено детектированием отражения хлорофилла, который содержится в сине-зеленых водорослях. Данный индекс не дает больше информации, чем визуальное наблюдение снимков в видимой области спектра [25].

NDWI (Normalized Difference Water Index – нормализованный разностный водный индекс) традиционно применяется для выделения границ водных объектов на фоне почвы и растительности [25].

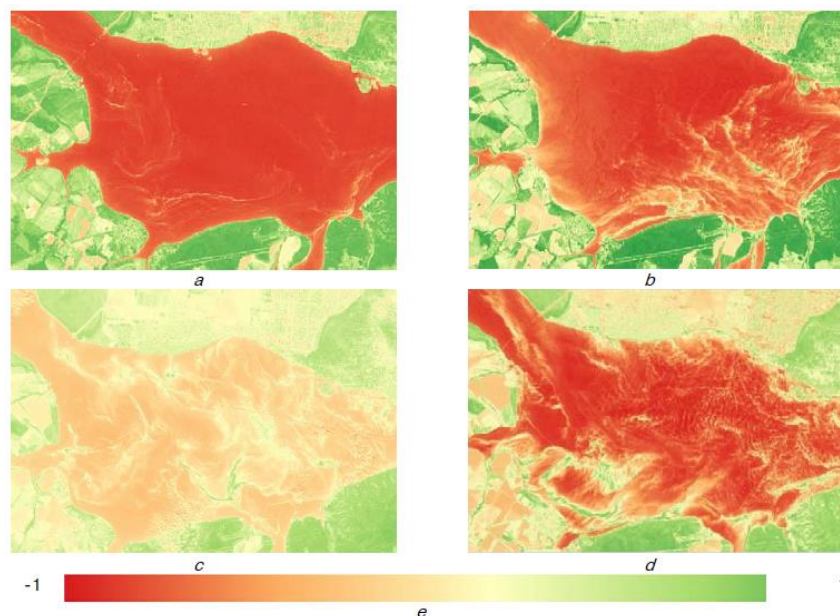


Рисунок 1. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDVI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; в – дата снимка: 14.08.2021; г – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений NDVI [25]

SIPi (Structure Intensive Pigment Index – структурный индекс интенсивности пигмента) применяется в основном для определения эффективности использования растениями поступающего света для фотосинтеза и помогает оценивать их здоровье. SIPi рассматривается как индекс для наблюдения за циклами развития сине-зеленых водорослей, включающими раннее развитие, полноценную деятельность, угасание развития и отмирание [25]. Индексы вычисляются по формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}, \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{green - NIR}{green + NIR}, \quad (2)$$

$$SIPi = \frac{NIR - blue}{NIR - red}, \quad (3)$$

где red – красная область спектра (Band 4), green – зеленая область спектра (Band 3), blue – синяя область спектра (Band 2), NIR – ближняя инфракрасная область спектра (Band 8) [29].

Суть методов обработки, отражаемых в формулах (1-3), состоит в том, что в числителе берутся цифровые отсчеты, соответствующие регистрации излучения

в узких зонах спектрального диапазона (red, green, blue, NIR) и вычитаются парами в зависимости от выбранного для обработки способа, а затем нормируются относительно их же суммы (1, 2) или разности (3) (знаменатель).

Представленные снимки с обработкой и расчетом индекса NDVI иллюстрируют изменение активности поглощения кислорода при фотосинтезе (рисунок 1). Замечено, что на снимке от 20 июня практически отсутствует биомасса. На снимках, сделанных позднее, начиная с 18 июля, видны значительные массивные скопления. Наиболее интенсивное образование биомассы происходит вдоль прибрежной полосы [25]. Далее следует пик распространения водорослей, а затем спад.

Авторами [25] предложено использование данного индекса для более четкого определения границ распространения сине-зеленых водорослей (рисунок 2). В частности, отмечено, что снимки, обработанные при помощи NDWI, а именно снимок от 14 августа, являются более информативными в связи с тем, что они меньше подвержены влиянию атмосферных явлений, которые проявились на рисунке 1 в виде снижения четкости изображения.

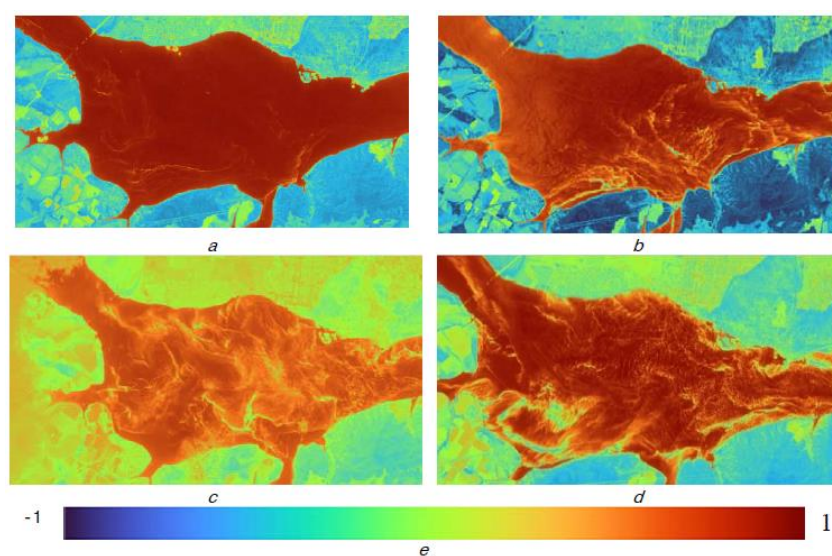


Рисунок 2. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDWI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; с – дата снимка: 14.08.2021; д – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений NDWI [25]

SIPI, в отличие от вегетационного и водного индекса, напрямую связан с оценкой жизнедеятельности фитопланктона. В отличие от NDVI он не только учитывает наличие объема хлорофилла, но затрагивает обменные процессы, которые могут свидетельствовать о стадиях роста и развития сине-зеленых водорослей (рисунок 3).

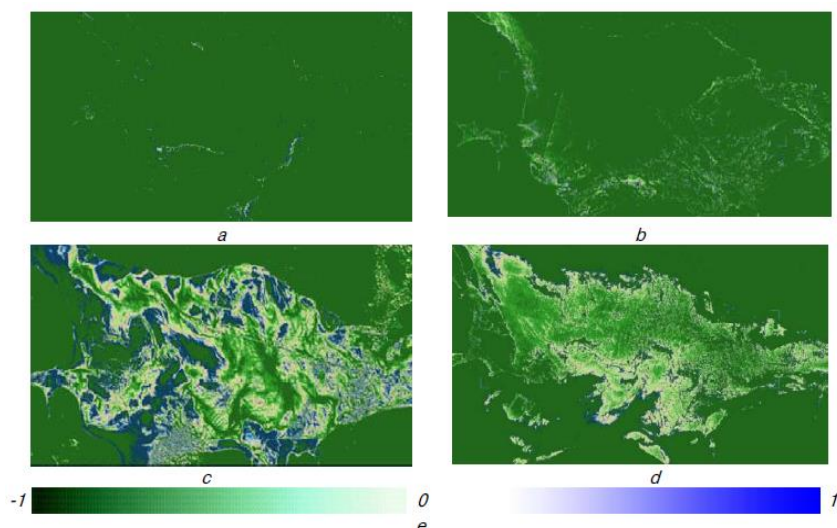


Рисунок 3. Спутниковые снимки, обработанные при помощи SIPI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; в – дата снимка: 14.08.2021; г – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений SIPI [25]

На снимке от 20 июня происходит очаговое развитие биомассы. Далее, с повышением температуры воды к 18 июля, идет более интенсивное размножение сине-зеленых водорослей, при этом отсутствуют участки с отмирающими водорослями. На снимке от 14 августа можно заметить участки синего цвета, которые могут являться скоплением угнетенной биомассы со сниженным метаболизмом. Снимок от 18 августа уже не детектирует значительную часть еще выделяемых на снимках, обработанных при помощи вегетационных индексов сине-зеленых водорослей [25].

Результаты, приведенные на рисунках 1-3 показывают явное улучшение визуального восприятия изображений, яркие контрастные цвета, четкость границ между соседними зонами, которые позволяют провести классификацию каждой из них. Но снимок от 14 августа на рисунке 1, а особенно снимки от 20 июня и 18 июля на рисунке 3, несут крайне мало информации, что определяет тенденцию к дальнейшему улучшению существующих методов и разработке новых.

Перспективным развитием обработки снимков при дистанционном зондировании Земли является использование методов дифференциальной спектральной визуализации [8-10], мультипликативного метода [14], а также использование псевдогиперспектральных изображений на основе мультиспектральных снимков [32] позволяющих извлечь дополнительную информацию из изображения без увеличения количества спектральных каналов.

Тенденцией в развитии методов ДЗЗ является применение для этих целей гиперспектральных методов [33-36], обеспечивающих количество каналов до нескольких сотен, однако, поскольку мощность лучистого потока в узком спектральном диапазоне мала, такие методы при реализации требуют фотоприемников с большим размером пикселя, а, следовательно, низкой четкости.

Гиперспектральные системы более сложны в реализации, что к увеличению габаритов и стоимости.

Среди перспективных направлений развития методов ДЗЗ следует отметить повышение разрешения спектральных снимков методом слияния [27, 37-39]. Данный метод заключается в совмещении панхроматического изображения высокого разрешения с мультиспектральным низкого разрешения, что дает более подробную и четкую информацию об объектах на снимке.

Заключение

В дистанционном зондировании Земли активно используются спектральные снимки. Различные области практического применения используют широкую номенклатуру методов цифровой спектральной визуализации, от общедоступных до узкоспециализированных и трудно-воспроизводимых.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения числа визуализируемых спектральных каналов и применения в ДЗЗ гиперспектральных и псевдогиперспектральных методов. В той связи большой интерес представляет развитие методов дифференциальной и интегральной обработки спектральных изображений, позволяющих получить дополнительную визуальную информацию.

Перспективным направлением являются также методы, позволяющие повысить контрастную чувствительность гиперспектральных систем при сохранении четкости цифровых телевизионных изображений за счет слияния пары изображений: изображения с высоким спектральным, но низким пространственным разрешением и изображения, с высоким пространственным, но низким спектральным разрешением.

Список литературы

1. Шарак Д. С., Михнёнок Е. И., Шеин А. С., Хижняк А. В. Объединение изображений, получаемых по данным источников различного спектрального диапазона // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). 2017. 3(105). 45-51.
2. Корнышев Н. П., Лифар А. В., Ляховицкий Е. А., Родионов И. С., Цыпкин Д. О., Шеин Г. М. Телевизионные и оптико-электронные методы исследования исторических бумаг // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2013. 1-2. 153-158.
3. Корнышев Н. П. Новые возможности телевизионных спектральных систем // Фотография. Изображение. Документ. 2015. 6(6). 89-93.
4. Зубарев Ю. Б., Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Спектральные методы и системы в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. 1. 47-64.
5. Корнышев Н. П., Калитов М. А., Сенин А. С. Применение телевизионных спектральных методов при исследовании музейных объектов // 15-я

Международная конференция «Телевидение: передача и обработка изображений», 26-27 июня 2018 г.: материалы конференции. Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2018. С. 105-107.

6. Сагдуллаев Ю. С., Ковин С. Д. Формирование и совместная обработка сигналов спектрзональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. 5. 44-57.

7. Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Основы построения информационно-измерительных систем спектрзонального телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. 4. 59-67.

8. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Интегрально-дифференциальный метод формирования сигналов в системах объемного спектрзонального телевидения // 13-я Международная конференция «Телевидение: передача и обработка изображений», 29-30 июня 2016 г.: материалы конференции. Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2016. С. 247-251.

9. Ваниев А. А., Калитов М. А. О повышении визуального качества дифференциальных спектрзональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. 4. 118-123.

10. Калитов М. А., Корнышев Н. П. Патент № 2679921 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01). Способ формирования цифровых спектрзональных телевизионных сигналов: № 2018116286, 2018.04.28, заявл. 2018.04.28: опубл. 2019.02.14 / патентообладатель Закрытое акционерное общество «ЭЛСИ».

11. Калитов М. А., Корнышев И. П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрзональных изображений // Вестник НовГУ. 2020. 2(118). 76-78. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).76-78

12. Борисов Д. И., Ерганжиев Н. А., Калитов М. А., Корнышев Н. П. Патент № 2731880 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01). Способ формирования цифровых спектрзональных телевизионных сигналов: № 2020102199, 2020.01.20, заявл. 2020.01.20: опубл. 2020.09.08 / патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».

13. Ваниев А. А., Калитов М. А., Корнышев Н. П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрзональной визуализации // Вестник НовГУ. 2019. 4(116). 9-12. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).9-12

14. Гонсалес Р., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений / перевод с английского Л. И. Рубанова, П. А. Чочи. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Техносфера, 2012. 1103 с.

15. Спектрогелиограф // Большая Советская Энциклопедия (СП): сайт. URL: <https://www.rulit.me/books/bolshaya-sovetskaya-enciklopediya-sp-read-88904-26.html> (дата обращения 21.12.2023).

16. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии / перевод с немецкого В. А. Буша [и др.]; под редакцией В. Г. Трифонова. Москва: Мир, 1988. 343 с.

17. Кравцова В. И. Космические методы исследования почв: учебное пособие для студентов вузов. Москва: Аспект Пресс, 2005. 190 с.

18. Киенко Ю. П. Основы космического природоведения: учебник для вузов. Москва: Картоцентр – Геодезиздат, 1999. 285 с.

19. Малинников В. А., Стеценко А. Ф., Алтынов А. Е., Попов С. М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: учебное пособие для студентов вузов. Москва: Изд. МИИГАиК, 2008. 145 с.

20. Гаврилова О. И., Грязькин А. В., Ольхин Ю. В. Использование беспилотного летательного аппарата для оценки процесса формирования молодняков на вырубках // *Resources and Technology*. 2023. 20(3). 60-75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163
21. Подушин Ю. В., Савинский А. О., Мязина А. Н. Использование аэрофотосъемки мультиспектральной камерой для оценки эффективности применения гербицидов // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2021. 174. 359-378. DOI: 10.21515/1990-4665-174-027
22. Белов М. Л., Белов А. М., Городничев В. А., Альков С. В. Анализ возможностей мультиспектрального оптического метода мониторинга лесных территорий // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение*. 2022. 4(141). 56-69. DOI: 10.18698/0236-3933-2022-4-56-69
23. Журбин И. В., Злобина А. Г., Шаура А. С., Баженова А. И. Статистический анализ данных многозональной съемки для реконструкции археологических памятников // *Химическая физика и мезоскопия*. 2022. 24(1). 56-68. DOI: 10.31857/S0869606322040195
24. Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // *Вопросы лесной науки*. 2022. 5(4). 1-21. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-115
25. Sherstobitov D. N., Ermakov V. V., Pystin V. N., Tupitsyna O. V. Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices // *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023. 31(2). 232-240. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240
26. Гарафутдинова Л. В., Каличкин В. К., Хлебникова Е. П. Оценка методов классификации многозональных космических снимков // *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2022. 4(48). 19-28. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_19
27. Голуб Ю. И. Оценка результатов повышения разрешения мультиспектральных спутниковых изображений методом слияния // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2022. 2. 10-19. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-2-10-19
28. Зотов С. А., Дмитриев Е. В., Мельник П. Г., Кондранин Т. В. Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. 2(386). 84-104. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104
29. Hu C., He M.-X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area // *Eos Transactions American Geophysical Union*. 2008. 89(33). 302-303. DOI: 10.1029/2008EO330002
30. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // *Remote Sensing of Environment*. 2009. 113(10). 2118-2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012
31. Siddiqui M. D., Zaidi A. Z., Abdullah M. Performance assessment of newly developed seaweed enhancing index // *Remote Sensing*. 2008. 11(12). 1-14. DOI: 10.3390/rs11121434
32. Корнышев Н. П., Гареев В. М., Гареев М. В., Серебряков Д. А. Особенности формирования псевдогиперспектральных изображений из RGB компонент // *Вестник НовГУ*. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177

33. Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2006. 3(64). 11-24.
34. Серебряков Д. А., Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 1. 128-133.
35. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Карачинов В. А., Гаврушко В. В., Быстров Н. Е. Двухканальная гиперспектральная система // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670
36. Гареев В. М., Гареев М. В., Лебединский Н. И., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Гиперспектральная система видимого диапазона на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
37. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компьютерное моделирование процедур слияния гиперспектральных и панхроматических изображений с использованием вейвлет-преобразования // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 158-168. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).158-168
38. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных спектрозональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 2. 19-24.
39. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 3. 53-59.

References

1. Sharak D. S., Mikhnyonok E. I., Shein A. S., Khizhnyak A. V. [Combining images obtained from data from sources of different spectral ranges] // Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki (BGUIR). 2017. 3(105). 45-51.
2. Kornyshev N. P., Lifar A. V., Lyakhovitsky E. A., Rodionov I. S., Tsyarkin D. O., Shein G. M. Televizionnyye i optiko-elektronnyye metody issledovaniya istoricheskikh bumag [Television and optical-electronic methods for studying historical papers] // Systems and television and radio communications. 2013. 1-2. 153-158.
3. Kornyshev N. P. Novyye vozmozhnosti televizionnykh spektral'nykh sistem [New possibilities of television spectral systems] // Photography. Image. Document. 2015. 6(6). 89-93.
4. Zubarev Yu. B., Sagdullaev Yu. S., Sagdullaev T. Yu. Spektrozonal'nyye metody i sistemy v kosmicheskom teledenii [Multi-wave-zones methods and systems in space TV] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya. 2009. 1. 47-64.
5. Kornyshev N. P., Kalitov M. A., Senin A. S. Primeneniye televizionnykh spektrozonal'nykh metodov pri issledovanii muzeynykh ob'yektov [Application of television spectrozonal methods in the study of museum objects] // 15th International Conference "Television: Image Transmission and Processing", June 26-27, 2018: conference proceedings. Saint-Petersburg: LETI, 2018. P. 105-107.
6. Sagdullaev Yu. S., Kovin S. D. Formirovaniye i sovmestnaya obrabotka signalov spektrozonal'nykh izobrazheniy [Formation and joint signal processing of multispectral images] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya. 2015. 5. 44-57.

7. Sagdullaev Yu. S., Sagdullaev T. Yu. Osnovy postroyeniya informatsionno-izmeritel'nykh sistem spektrozonal'nogo televideniya [Fundamentals of constructing information-measuring systems for spectrozonal television] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. 4. 59-67.
8. Sagdullaev T. Yu., Sagdullaev Yu. S. Integral'no-differentsial'nyy metod formirovaniya signalov v sistemakh ob'yemnogo spektrozonal'nogo televideniya [Integrated and differential method of formation of signals in systems of volume multispectral television] // 13th International Conference "Television: Image Transmission and Processing, June 29-30, 2016: conference proceedings. Saint-Petersburg: LETI, 2016. P. 247-251.
9. Vaniev A. A., Kalitov M. A., Kornyshev N. P. O povyshenii vizual'nogo kachestva differentsial'nykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Improvement of images obtained by the method of differential multispectral imaging] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2019. 4. 118-123.
10. Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Patent No. 2679921 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01). Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [Method of forming digital spectrozonal television signals]: No. 2018116286, 2018.04.28, application 2018.04.28: publ. 2019.02.14 / patent holder JSC "ELSY".
11. Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Komp'yuternoye modelirovaniye mul'tiplikativnogo metoda formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method] // Vestnik NovSU. 2020. 2(118). 76-78. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).76-78
12. Borisov D.I., Erganzhiev N.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Patent No. 2731880 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01). Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [Method for generating digital spectrum-zonal television signals]: No. 2020102199, 2020.01.20, application 2020.01.20: publ. 2020.09.08 / patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University".
13. Vaniev A. A., Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Uluchsheniye izobrazheniy, poluchennykh metodom differentsial'noy spektrozonal'noy vizualizatsii [Improvement of images obtained by the method of differential multispectral imaging] // Vestnik NovSU. 2019. 4(116). 9-12. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).9-12
14. Gonzalez R., Woods R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing] / translated from English by L. I. Rubanova, P. A. Chochi. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Technosphaera, 2012. 1103 p.
15. Spectroheliograph // Great Soviet Encyclopedia (SE): website. URL: <https://www.rulit.me/books/bolshaya-sovetskaya-enciklopediya-sp-read-88904-26.html> (accessed: 21.12.2023).
16. Kronberg P. Distantstionnoye izucheniye Zemli: osnovy i metody distantstionnykh issledovaniy v geologii [Remote sensing of the Earth: fundamentals and methods of remote sensing in geology] / translation from German by V. A. Bush [et al.]; edited by V. G. Trifonov. Moscow: Mir, 1988. 343 p.
17. Kravtsova V.I. Space methods for soil research: a textbook for university students. Moscow: Aspect Press Ltd., 2005. 190 p.
18. Kienko Yu. P. Osnovy kosmicheskogo prirodovedeniya: uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of space natural science: a textbook for universities]. Moscow: Kartgeocentr– Geodezizdat, 1999. 285 p.
19. Malinnikov V. A., Stetsenko A. F., Altynov A. E., Popov S. M. Monitoring prirodnoy sredy aerokosmicheskimi sredstvami: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov

[Monitoring the natural environment using aerospace means: a textbook for university students]. Moscow: MII GAIK publ. house, 2008. 145 p.

20. Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Olkhin Yu. V. Ispol'zovaniye bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya otsenki protsessa formirovaniya molodnyakov na vyrubkakh [The use of unmanned aerial vehicles to assess young trees formation in clean cutting areas] // Resources and Technology. 2023. 20(3). 60-75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163

21. Podushin Yu. V., Savinsky A. O., Myazina A. N. Ispol'zovaniye aerofotos'yomki mul'tispektral'noy kameroy dlya otsenki effektivnosti primeneniya gerbitsidov [Using aerial photography with a multispectral camera to evaluate the effectiveness of herbicides] // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2021. 174. 359-378. DOI: 10.21515/1990-4665-174-027

22. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A., Alkov S. V. Analiz vozmozhnostey mul'tispektral'nogo opticheskogo metoda monitoringa lesnykh territoriy [Analysis of capabilities of the multispectral optical method in monitoring the forest territories] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2022. 4(141). 56-69. DOI: 10.18698/0236-3933-2022-4-56-69

23. Zhurbin I.V., Zlobina A.G., Shaura A.S., Bazhenova A.I. Statisticheskii analiz dannykh mnogoazonal'noy s'yemki dlya rekonstruktsii arkheologicheskikh pamyatnikov [Statistical Analysis of Multispectral Imaging Data for the Reconstruction of Archaeological Sites] // Chemical physics and mesoscopy. 2022. 24(1). 56-68. DOI: 10.31857/S0869606322040195

24. Podolskaia E. S. Ispol'zovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa dlya raspoznavaniya izobrazheniya dorog v lesnom khozyaystve [Use of remote sensing data from space for road image recognition in the forestry] // Forest science issues. 2022. 5(4). 1-21. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-115

25. Sherstobitov D. N., Ermakov V. V., Pystin V. N., Tupitsyna O. V. Monitoring of the development of blue-green algae in the kuibyshev reservoir using remote sensing indices // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. 31(2). 232-240. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240

26. Garafutdinova L. V., Kalichkin V. K., Khlebnikova E. P. Otsenka metodov klassifikatsii mnogoazonal'nykh kosmicheskikh snimkov [Evaluation of methods for multispectral space images classification] // Vestnik of Omsk State Agrarian University 2022. 4(48). 19-28. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_19

27. Golub Yu. I. Otsenka rezul'tatov povysheniya razresheniya mul'tispektral'nykh sputnikovykh izobrazheniy metodom sliyaniya [Evaluation of the results of pansharpening multispectral images] // System analysis and applied information science. 2022. 2. 10-19. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-2-10-19

28. Zotov S. A., Dmitriev E. V., Melnik P. G., Kondranin T. V. Povysheniye informativnosti mul'tispektral'nykh sputnikovykh izobrazheniy s ispol'zovaniyem dannykh tekturnogo analiza [Increasing the informativity of multispectral satellite images using texture analysis data] // Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2022. 2(386). 84-104. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104

29. Hu C., He M.-X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area // Eos Transactions American Geophysical Union. 2008. 89(33). 302-303. DOI: 10.1029/2008EO330002

30. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. 113(10). 2118-2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012

31. Siddiqui M. D., Zaidi A. Z., Abdullah M. Performance assessment of newly developed seaweed enhancing index // Remote Sensing. 2008. 11(12). 1-14. DOI: 10.3390/rs11121434
32. Kornyshev N. P., Gareev V. M., Gareev M. V., Serebryakov D. A. Osobennosti formirovaniya psevdogiperspektral'nykh izobrazheniy iz RGB komponent [Features of the formation of pseudo-hyperspectral images from RGB components] // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177
33. Kalinin A. P., Orlov A. G., Rodionov I. D. Aviatsionnyy giperspektrometr [Aviation hyper-spectrometer] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2006. 3(64). 11-24.
34. Serebryakov D. A., Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P. Osobennosti formirovaniya izobrazheniy v giperspektral'noy sisteme na baze interferometra Fabri-Pero [Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2023. 1. 128-133.
35. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Karachinov V. A., Gavrushko V. V., Bystrov N. E. Dvukhkanal'naya giperspektral'naya sistema [Two-channel hyperspectral system] // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670
36. Gareev V.M., Gareev M.V., Lebedinsky N.I., Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Giperspektral'naya sistema vidimogo diapazona na baze interferometra Fabri-Pero [Hyperspectral visible range system based on the Fabry-Pérot interferometer] // Vestnik NovSU. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
37. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Komp'yuternoye modelirovaniye protsedur sliyaniya giperspektral'nykh i pankhromaticheskikh izobrazheniy s ispol'zovaniyem veyvlet-preobrazovaniya [Computer simulation of procedures for merging hyperspectral and panchromatic images using wavelet transform] // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 158-168. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).158-168
38. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Metody povysheniya chetkosti tsifrovyykh televizionnykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Methods of increasing the clarity of digital television spectral images] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2023. 2. 19-24.
39. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Metody povysheniya chetkosti tsifrovyykh televizionnykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Methods of increasing the clarity of digital television spectral images] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2023. 3. 53-59

Информация об авторе

Калитов Михаил Андреевич – ведущий инженер, АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия),
 ORCID: 0009-0002-9419-2447, mikhail.kalitov@yandex.ru

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.7.013

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

ГРНТИ 31.15.33

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОСЕВОЙ АСИММЕТРИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ С ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Шергин С. С.¹, Скрыпов М. А.²

¹ АО «Аскольд» (Арсеньев, Россия)

² НПО «КВАНТ» (Великий Новгород, Россия)

Аннотация Современные тепловые трубы являясь специальными устройствами охлаждения, эффективно обеспечивают непрерывный отвод тепловой энергии. В настоящее время в РЭС широкое применение получил класс тепловых труб, корпуса которых изготовлены в виде профилей специальной конструкции из алюминиевых сплавов. В статье рассматривается новая методика диагностики качества тепловых труб с симметричной структурой по коэффициенту асимметрии. Экспериментально показано, что методы коэффициента асимметрии и коэффициента формы изотерм, адаптированные к диагностике качества тепловых труб с симметричной структурой, позволяют идентифицировать асимметрию теплопередачи при наличии латентных дефектов структуры тепловых труб.

Ключевые слова: топология, тепловая труба, изотерма, коэффициент асимметрии, теплоноситель

Для цитирования: Шергин С. С., Скрыпов М. А. Радиофизические методы идентификации осевой асимметрии теплопередачи в замкнутых системах с локализованными фазовыми переходами // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 108-122. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

Research Article

RADIOPHYSICAL METHODS OF IDENTIFICATION OF AXIAL ASYMMETRY OF HEAT TRANSFER IN CLOSED SYSTEMS WITH LOCALIZED PHASE TRANSITIONS

Shergin S. S.¹, Skrypov M. A.²

¹ JSC "Ascold" (Arsentev, Russia)

² NPO "KVANT" (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract Modern heat pipes (HP), being special cooling devices, effectively ensure the continuous removal of thermal energy. Currently, the HP class is widely used in RES, the housings of which are made in the form of profiles of a special design made of aluminum alloys. The article discusses a new technique for diagnosing the quality of HP with a symmetrical structure by the asymmetry coefficient. It has been experimentally shown that the methods of the asymmetry coefficient and the isotherm shape coefficient, adapted to the diagnosis of the quality of heat pipes with a symmetrical structure, make it possible to identify the asymmetry of heat transfer in the presence of latent defects in the HP structure.

Keywords: heat pipe, isotherm, coefficient of asymmetry, coolant

For citation: Shergin S. S., Skrypov M. A. Radiophysical methods of identification of axial asymmetry of heat transfer in closed systems with localized phase transitions // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 108-122. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).108-122

Введение

Известно, что тепловые трубы (ТТ) относятся к классу устройств в герметичных оболочках, внутри которых протекают многочисленные физико-химические процессы, а базовыми являются локализованные фазовые переходы в виде испарения и конденсации теплоносителя [1-3]. К настоящему времени благодаря широкому внедрению технологий на основе ТТ в различные сферы жизнедеятельности человека накоплен и обобщен значительный объем сведений, отражающий влияние технологических и эксплуатационных факторов на надежность и важнейшие характеристики ТТ [4-6]. В то же время следует отметить, что технология производства и сборки ТТ в различных фирмах постоянно изменяется, также как и методы контроля качества технологических операций, а это требует не только уточнения роли таких известных факторов, как материал корпуса, химический состав теплоносителя, но и совершенствование методов диагностики [7-9].

Следует отметить, что при разработке методик диагностики качества изделий различного назначения в герметичных оболочках, предпочтение отдается неразрушающим методам [10]. Необходимо также подчеркнуть, что для ТТ нет универсальных методов и такое положение связано прежде всего с широкой номенклатурой данных изделий, технологией изготовления и сборки, принципами работы, типами дефектов, условиями эксплуатации и др. В роли тестирующего сигнала часто выступает электрический ток, электромагнитные и ультразвуковые волны [7]. Среди них класс оптических методов обладает повышенной информативностью особенно в связи с развитием тепловизионной, лазерной техники, возможностью проведения измерений характеристик теплового поля ТТ в реальном масштабе времени с использованием в роли функции качества коэффициентов асимметрии или коэффициента формы изотерм [10-14]. Изучению этих вопросов и посвящена данная работа.

Методика исследований

В процессе выполнения НИР был разработан и изготовлен лабораторный измерительный стенд, структурная схема которого приведены на рисунке 1. Он включал рабочий стол с регулируемым уровнем, на который устанавливалась исследуемая ТТ (1). Для защиты ТТ от внешних засветок использовался кожух (бокс). Контроль теплового состояния ТТ и ИИТП осуществлялся как контактным, так и бесконтактным методами, в которых применялись измерители температуры (2), на основе цифрового вольтметра (МУ-63) с термопарой ТХА (хромель-алюмель), а также ИК – пирометр - Mastech MS6530. Для нестационарного нагрева ИИТП, роль которого выполнял пленочный резистор на ситалловой подложке прямоугольной формы, использовался генератор импульсов (4).

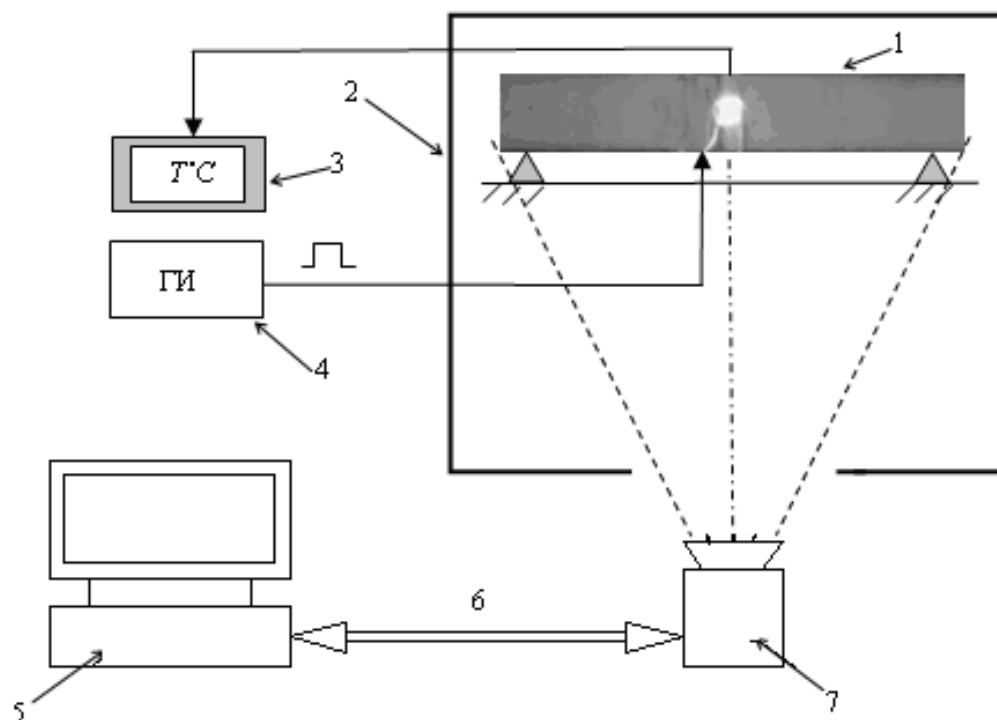


Рисунок 1. Структурная схема измерительного стенда: 1 – Тепловая труба с ИИТП и датчиком температуры; 2 – защитный кожух (экран); 3 – Цифровой, термопарный измеритель температуры; 4 – Генератор импульсов (источник электропитания); 5 – ПЭВМ с ППП; 6 – Канал связи; 7 – Тепловизионная камера

Регистрация теплового, яркостного контраста ТТ осуществлялась с помощью телевизионной измерительной системы (ТИС), включающей: ИК – телевизионную камеру (7) КТП-326Ех (взрывобезопасное исполнение, разработчик – ОАО «НИИ ПТ Растр») на базе неохлаждаемого тепловизионного модуля IR-113); канал связи (6); и ПЭВМ (5) с ПО для ввода и сохранения изображения – «Радуга»; для обработки изображения и проведения измерений коэффициента асимметрии (AS) «Parus 5.0» и соответственно «Парус-Симметрия 1.0»; для обработки изображения и проведения измерений коэффициента формы изотерм «The Geometer's Sketchpad V4» («Живая геометрия»). Расстояние от исследуемой ТТ до входного объектива КТП-326Ех не превышало одного метра. Настройка и калибровка ТИС осуществлялась по макету абсолютно черного тела.

Для повышения достоверности в экспериментах использовались только низкотемпературных ТТ, обладающих симметричной структурой – плоские, а также профильные, которые в последнее время получили массовое распространение [2, 5, 6]. В качестве рабочих жидкостей (теплоноситель) в них использовался спирт, ацетон, аммиак. Такой подход позволял в идеальном случае формировать в исследуемой ТТ от одного ИИТП, расположенного в центре, измерительные сигналы в виде синхронно распространяющихся в противоположных направлениях одинаковых тепловых потоков – принцип реверсивных тепловых потоков. При этом

любые нарушения условий распространения этих потоков во времени и пространстве (дефекты и др. причины) в соответствии с теорией теплопроводности должны приводить к морфологическим изменениям температурных полей, создаваемым этими реверсивными потоками, в частности в корпусе ТТ, а следовательно, только в этом случае возможно формирование тепловых контрастов подлежащих регистрации техническими средствами. После достижения температурного равновесия тепловые контрасты угасали.

Результаты исследований

Метод коэффициента асимметрии

В условиях пускового режима существующие методы обработки тепловизионного изображения профильной тепловой трубы (ТТ) для любого момента времени позволяют выделять температурный срез в виде изотермической линии определенной формы [15]. Этот факт, при центральном расположении импульсного источника теплового потока (ИИТП) на трубе, задачу оценки ее качества сводит к проблеме сравнения геометрических фигур, образованных данными изолиниями. При этом роль функционального показателя качества (критерия) ТТ отводится коэффициенту асимметрии A_S по соответствующему признаку L , Π , S , информативность которых была подтверждена в предыдущих наших работах [7, 8, 12]. Такая изопериметрическая задача широко распространена в настоящее время и остается актуальной в математике, механике сплошных сред, теплофизике, строительной механике и др., где объектами исследований являются, например, оболочки и полости, стержни, пластины и мембраны и т.п. Известно, что коэффициент асимметрии (A_S , *skewness*) согласно теории вероятности - величина, характеризующая асимметрию распределения случайной величины в практических расчетах дает возможность определить не только величину асимметрии, но и проверить наличие асимметрии в генеральной совокупности.

При решении инженерной задачи диагностики качества ТТ в условиях реального производства, как разновидности изопериметрической задачи, на первое место выступает методика построения классификатора.

Режим скользящей изотермы позволяет осуществлять измерение выбранных признаков для конкретной изотермической линии с левой и правой стороны ТТ относительно центра в течении действия греющего теплового импульса. Чтобы удобнее было сравнивать между собой оценки для разных признаков, величина асимметрии учитывалась в относительных единицах. Для этого модуль разности между оценками признаков слева (L_i) и справа (R_i) делился на сумму этих же оценок:

$$A_{Si} = |L_i - R_i| / |L_i + R_i| \quad (1)$$

Необходимо отметить, что предельным значениям коэффициента асимметрии согласно (1), соответствуют положения изотерм в ТТ, приведенные на рисунке 2.

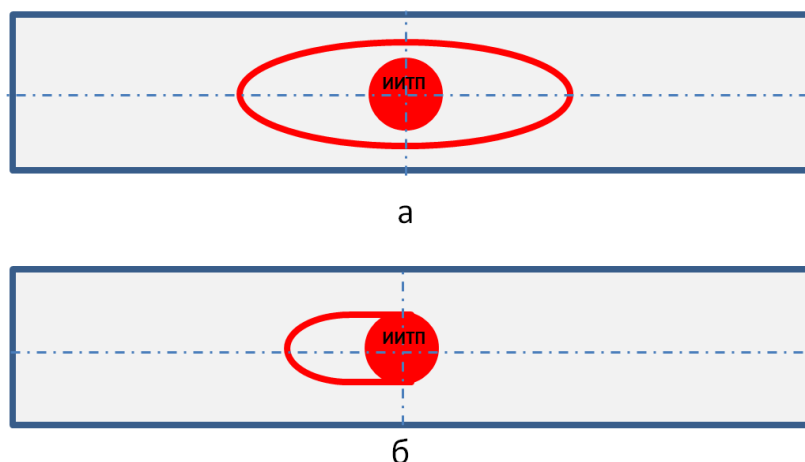


Рисунок 2. Модельное представление изотерм в ТТ для предельных значений коэффициента асимметрии. Пример. а - $A_S = 0$; б - $A_S = 1$

На основе проведенных исследований была разработана методика расчета коэффициентов асимметрии по признакам, включающая следующие процедуры:

а) измерение количественных характеристик признаков L , Π , S слева и справа от центра ТТ;

б) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку L в соответствии с выражением:

$$A_S^L = \frac{|L_L - L_P|}{|L_L + L_P|}, \quad (2)$$

где L_L и L_P – расстояние от центра изотермы для левой и правой части соответственно.

в) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку Π в соответствии с выражением:

$$A_S^\Pi = \frac{|\Pi_L - \Pi_P|}{|\Pi_L + \Pi_P|}, \quad (3)$$

где Π_L и Π_P – периметр изотермы для левой и правой части соответственно;

г) вычисление коэффициента асимметрии ТТ по признаку S в соответствии с выражением:

$$A_S^S = \frac{|S_L - S_P|}{|S_L + S_P|}, \quad (4)$$

где S_L и S_P – площадь изотермы для левой и правой части соответственно.

Алгоритм разбраковки ТТ приведен на рисунке 3.

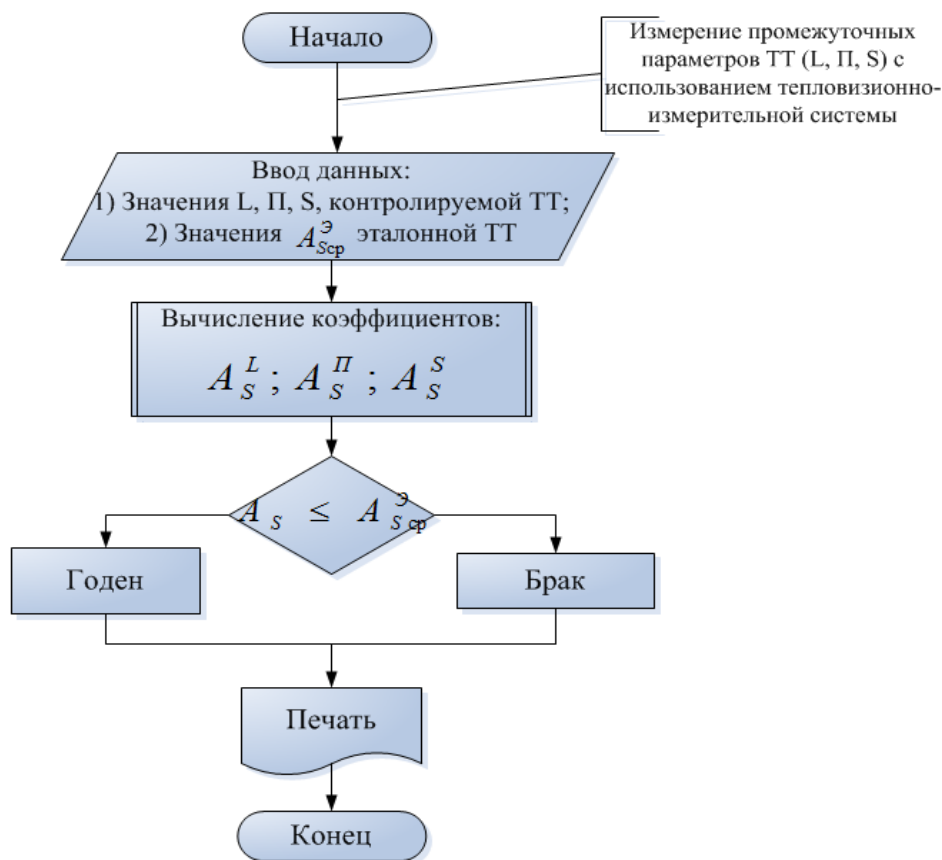


Рисунок 3. Алгоритм разбраковки ТТ

Как было показано в [12], выбранные признаки (L , Π , S) в конкретный момент времени действия теплового импульса обладают различной чувствительностью по отношению к типу присутствующего дефекта в ТТ, то целесообразно в процессе диагностики использовать соответствующие коэффициенты асимметрии A_S^L , A_S^{Π} , A_S^S без усреднения.

При построении классификатора использовался принцип “эталонной тепловой трубы” значения соответствующих коэффициентов асимметрии A_S^L , A_S^{Π} , A_S^S которой принимались за критерии. Тогда в первом приближении разбраковка конкретного типа ТТ по двум классам осуществлялась по условию:

- 1) $\{A_S^I\} > \{A_{S\epsilon}^I\}$ – Класс-1, ТТ без дефекта;
 - 2) $\{A_S^I\} \leq \{A_{S\epsilon}^I\}$ – Класс-2, ТТ с дефектом.
- где $\{A_S^I\} = \{A_S^L, A_S^{\Pi}, A_S^S\}$.

Расчет коэффициента асимметрии изотерм ТТ. Пример

Для проведения экспериментальных исследований использовались алюминиевые (АД31) ТТ (партия из пяти штук, №АТТ.010.06 ÷ 010.10) с габаритными размерами, $L_1 \times L_2 = 390 \times 30$ мм и максимальной теплотранспортной способностью $P \leq 120$ Вт, изготовленные в лаборатории Тепловых труб Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Дополнительно в корпусах двух ТТ на оси были изготовлена по одной поры в виде круглого глухого отверстия диаметром $d \approx 3$ мм и глубиной $h \approx 0,8$ мм., средой заполнения пор был воздух.

Для организации симметричных реверсивных тепловых потоков осуществлялась разметка ТТ с целью определения положения центра и области для установки ИИТП. Разметка осуществлялась по линейке с точностью $\pm 0,5$ мм.

С целью увеличения коэффициента излучения алюминиевой поверхности в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 8 \div 14$ мкм. Применялись черная тушь, черный матовый лак, сажа и пленки, а также пескоструйная обработка, которые, согласно справочным данным, обеспечивали значения коэффициента излучения не ниже $\varepsilon_\lambda \approx 0,96$. Толщина наносимых слоев не превышала 50 мкм.

Пленочный нагреватель с резистивным слоем на ситалловой подложке, выполняющий функции импульсного источника теплового потока, для уменьшения контактного теплового сопротивления крепился к поверхности ТТ через слой теплопроводящей пасты типа КТП-8. Для уменьшения потерь теплового потока в окружающую среду, поверхность нагревателя теплоизолировалась.

Для оценки осевой асимметрии теплопередачи в ТТ была реализована методика измерений с использованием ПО «Парус-Симметрия», при которой с помощью задатчика уровня последовательно через пять делений устанавливались значения (у.е.) яркости, начиная с уровня 90 (визуализировалась изотерма на минимальном расстоянии от границ ИИТП (рисунок 4)) до уровня со значением 125 (исключалось влияние краевых эффектов), и соответственно, вычислялись значения коэффициентов асимметрии по признакам [12].

В таблице 1 приведены примеры выполненных измерений. Анализ полученной статистики показал, что для ТТ, изготовленной промышленным способом и не содержащей специально введенные дефекты, коэффициенты асимметрии по признакам преимущественно оказываются отличными от нуля и их значения изменяются во втором знаке после запятой. Кроме того, в рамках двухуровневого критерия ($\min \div \max$) они имеют близкие значения в группах с одинаковой яркостью. Следует обратить внимание на то, что ни один из коэффициентов асимметрии не превысил значения 0,09.

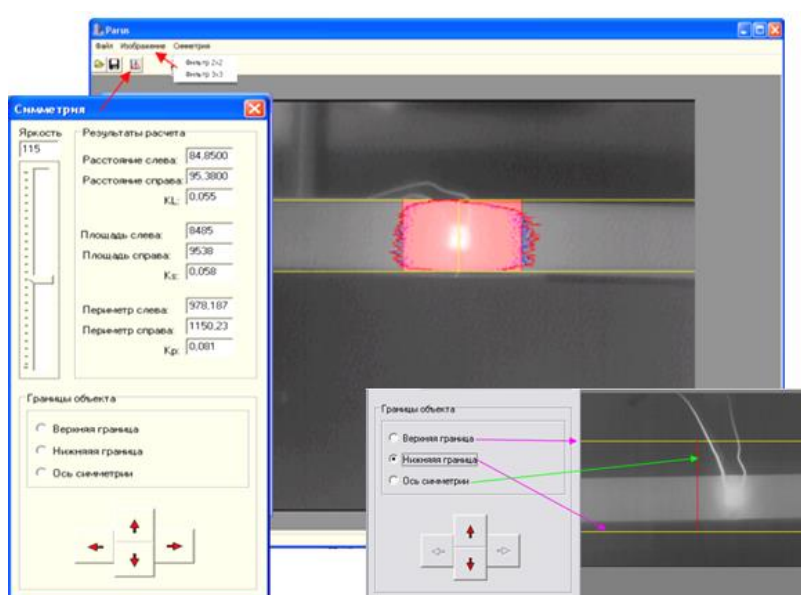


Рисунок 4. Главное окно программы "Парус-Симметрия". Фото

Таблица 1. Результаты вычислений коэффициентов асимметрии. Эксперимент.
Пример. Ацетоновые ТТ

Время, т, с	Яркость, у.е.	A^L_s	A^S_s	A^T_s
Тепловая труба без дефекта корпуса				
50	90	0,064	0,064	0,030
	95	0,060	0,063	0,028
	100	0,058	0,063	0,018
	105	0,030	0,033	0,051
	110	0,026	0,029	0,043
	115	0,019	0,023	0,002
	120	0,010	0,012	0,027
	125	0,012	0,013	0,049
Тепловая труба с дефектом корпуса				
50	90	0,143	0,146	0,012
	95	0,153	0,158	0,064
	100	0,135	0,138	0,077
	105	0,151	0,153	0,019
	110	0,105	0,108	0,029
	115	0,117	0,120	0,074
	120	0,115	0,116	0,058
	125	0,112	0,115	0,068

Для ТТ, содержащих специально введенный дефект корпуса, коэффициенты асимметрии по признакам претерпевают существенные изменения (таблица 1). Их значения не менее чем на порядок превышают аналогичные для ТТ при отсутствии в ней дефекта. Такая же ситуация возникает и при сравнении коэффициентов асимметрии на уровне предельных значений (с учетом возможных

выбросов). Причем на уровне “Min” два коэффициента асимметрии A^L_S и A^S_S превысили значения 0,09. Следует также отметить, что максимальные значения коэффициентов асимметрии регистрировались при положении фронта изотермы до места локализации дефекта.

Метод коэффициента формы

Известно, что для сравнения геометрических фигур правильной формы часто используются достаточно простые критерии: например, число сторон, площадь, периметр, смежные углы и др. [16-18]. В то же время эти критерии становятся бесполезными при сравнении фигур различных классов, в связи с чем в прикладных задачах наибольшее распространение получил критерий в виде коэффициента формы K_f (интегральная характеристика формы фигур, “crest factor” – англ.), приведенный на рисунке 5.

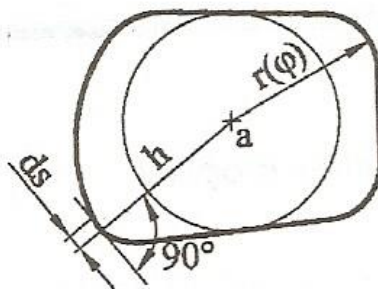


Рисунок 5. Изображение произвольной выпуклой области

Интеграл по контуру заданной фигуры

$$K_{fa} = \oint_L \frac{ds}{h}, \quad (5)$$

где ds – линейный элемент контура области – является количественной характеристикой формы области и называется коэффициентом формы.

Из ряда известных изопериметрических свойств коэффициента формы наиболее важное значение для решения поставленной задачи представляет возможность количественной оценки формы геометрических фигур как с выпуклым, так и вогнутым контуром. Это свойство применительно к обработке изображения морфологии теплового поля ТТ в режиме изолиний может выступать в роли критерия при оценке их симметричности. В таблицах 2 и 3 приведены базовые модельные округлые и гранные формы импульсных источников теплового потока, которые довольно часто в виде ЭРЭ активного с целью отвода от них тепла или служат зоной подвода теплового потока при известных методах диагностики качества ТТ [15]. В этом случае, как показали предварительные исследования,

выбор соответствующей формы ИИТП позволяет формировать тепловые измерительные сигналы изотермического типа наиболее чувствительных к наличию определённых структурных дефектов ТТ. Ниже приведен пример такой технологии.

Таблица 2. Базовые округлые формы импульсных источников теплового потока

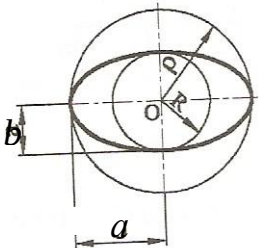
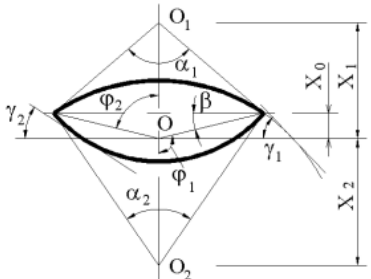
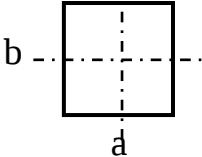
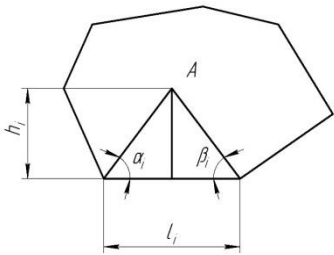
Округлая форма ИИТП	Коэффициент формы	
	Эллипс	$K_f = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$
	Несимметричная круговая луночка	$K_{fa} = 2 \left\{ \frac{\pi - \arctg(\sin \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_1} + \frac{\arctg(\sin \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_2} \right\}.$

Таблица 3. Базовые гранные формы импульсных источников теплового потока

Гранная форма ИИТП	Коэффициент формы	
	Прямоугольник (квадрат)	$K_f = \frac{4}{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}$ Для квадрата $a = b$
	Полигональная фигура	$K_{fa} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_i)$ $= \sum_{i=1}^n (\operatorname{ctg} \alpha_i + \operatorname{ctg} \beta_{i-1})$ n – число сторон

Расчет коэффициента формы изотерм ТТ. Пример

Для проведения экспериментальных исследований, как и предыдущих опытах, использовалась партия алюминиевых ацетоновых труб, прошедших необходимую технологическую подготовку: разметка, изготовление дефекта-поры, чернение, посадка гранного (квадратной формы) ИИТП.

С помощью ТИС регистрировались яркостные контрасты теплонагруженных ТТ, которые подвергались цифровой обработки в ПО “Parus 5.0” с целью визуализации особенностей теплового поля (рисунок 6).

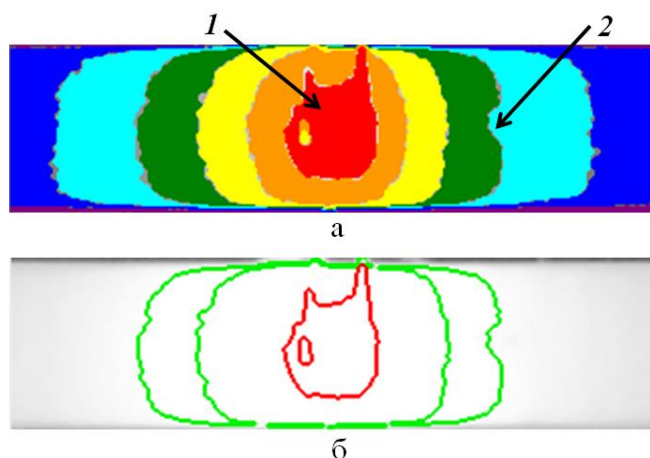


Рисунок 6. Морфология теплового поля ацетоновой тепловой трубы с дефектом корпуса. Гранный ИИТП квадратной формы. Эксперимент. Фото. ПО “Парус - К”: а – режим термографии (1 – ИИТП; 2 – область дефекта (пора)); б – режим изолиний (контур дефекта $T = 32,5^{\circ}\text{C}$)

Так, в режиме термографии (рисунок 6а) достаточно хорошо визуализировалась система изотермических зон, отличавшихся гомогенностью и с отчетливой областью структурного дефекта ТТ. Режим изолиний (рисунок 6б) позволил получить контурное изображение особенностей теплового поля с дефектом, пригодного для дальнейшей обработки в ПО «Живая геометрия» (рисунок 7).

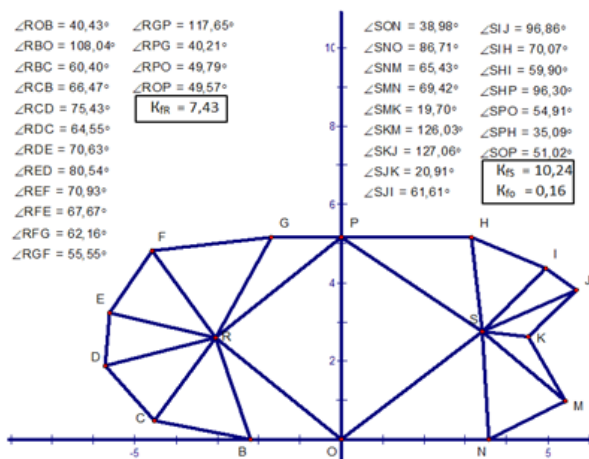


Рисунок 7. Расчет коэффициентов формы изотерм в ацетоновой тепловой трубе с дефектом корпуса. Пример. Эксперимент. Фото. ПО «Живая геометрия»

В рамках использования данной программы был реализован метод разбиения на треугольные элементы и выполнены все необходимые измерения углов, размеров, а также расчеты коэффициентов формы фигур слева и справа от визирной линии ТТ (K_{IR} , K_{IS}) и относительного коэффициента формы (K_{IO}):

$$K_{fo} = \left| \frac{K_{fR} - K_{fS}}{K_{fR} + K_{fS}} \right|, \quad (6)$$

Скольжение выделенных изотерм вдоль продольной оси ТТ во времени сопровождается изменением их формы, в том числе, за счет взаимодействия с латентными дефектами различной природы. Поэтому несомненный интерес представляет характер эволюции коэффициента асимметрии во времени, показанный на рисунке 8. Достаточно хорошо видно, что K_{fo} уже в начальный момент времени (до дефекта) принимает значения больше аналогичного коэффициента для ТТ, не содержащей дефект. А это открывает путь к технологии диагностики качества ТТ.

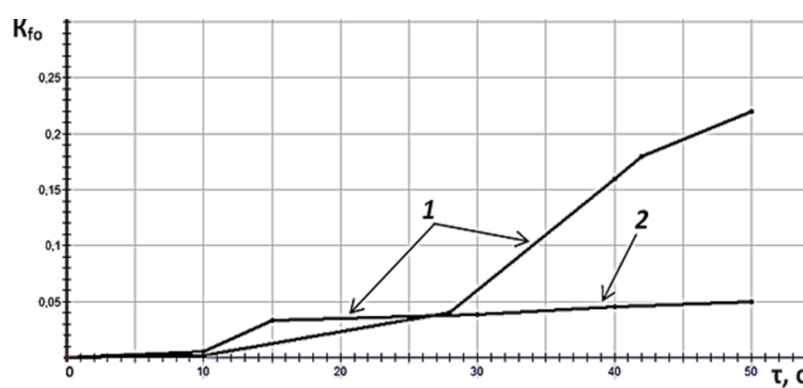


Рисунок 8. Изменение относительного коэффициента формы изотермы во времени. Эксперимент. ПО “Живая геометрия”: 1- ацетоновая тепловая труба с искусственным дефектом корпуса; 2 - ацетоновая тепловая труба без дефекта корпуса

Из анализа полученной статистики значений относительного коэффициента формы изотермы на данном этапе может быть предложен следующий алгоритм:

- при K_{fo} близком к 0 – тепловая труба высокого качества;
- при K_{fo} от 0,01 до 0,1 – тепловая труба среднего качества;
- при K_{fo} больше 0,1 – тепловая труба ниже среднего качества.

Вывод

Экспериментально показано, что методы коэффициента асимметрии и коэффициента формы изотерм, адаптированные к диагностике качества тепловых труб с симметричной структурой, позволяют идентифицировать асимметрию теплопередачи при наличии латентных дефектов структуры ТТ.

Благодарность

Авторы выражают благодарность за организацию эффективной научной деятельности и неоценимую помощь в подготовке материалов данной статьи своему научному руководителю Владимиру Александровичу Карачинову, безвременно ушедшему 04.01.2024.

Список литературы

1. Дан П. Д., Рэй Д. А. Тепловые трубы / перевод с английского Ю. А. Зейгарника. Москва: Энергия, 1979. 272 с.
2. Дульнев Г. Н., Беляков А. П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. Москва: Радио и связь, 1985. 96 с.
3. Карачинов В. А. Защита РЭС в экстремальных условиях. Специальные устройства охлаждения: учебное пособие. Великий Новгород: изд-во НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2007. 176 с.
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Чулков Б. А., Ягодкин И. В. Технологические основы тепловых труб. Москва: Атомиздат, 1980. 160 с.
5. Лукс А. Л., Матвеев А. Г. Исследование высокоэффективных аммиачных тепловых труб энергосберегающих систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата // Вестник Самарского государственного университета. Естественнаучная серия. 2007. 6(56). 401-418.
6. Деревянко В. А., Нестеров Д. А., Косенко В. Е., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Фаткулин Р. Ф., Сунцов С. Б. Плоские тепловые трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры в космических аппаратах // Вестник Сибирского государственного университета им. М. Ф. Решетнева. 2013. 6(52). 111-116.
7. Карачинов В. А., Петров Д. А., Килиба Ю. В. Анализ методов контроля качества тепловых труб // Вестник НовГУ. 2019. 2(114). 14-18. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.2(114).14-18
8. Карачинов В. А., Калиба Ю. В., Петров Д. А., Ионов А. С. Патент № 2685804 Российская Федерация МПК F28D 15/02 (2006.01), G01J5/100 (2006.01). Способ контроля качества тепловой трубы: № 2018116914: заявл. 07.05.2018: опубл. 23.04.2019 / заявитель АО ОКБ-Планета.
9. Карачинов В. А., Петров Д. А., Ионов А. С., Петров Д. А., Евстигнеев Д. А. Патент № 2724316 Российская Федерация МПК G01M 3/20 (2006.01). Способ контроля качества аммиачной тепловой трубы: № 2019136400: заявл. 11.12.2019: опубл. 22.06.2020 / заявитель АО ОКБ-Планета.
10. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общей редакцией В. В. Клюева. Т. 5: в 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / составитель В. П. Вавилов. Москва: Машиностроение, 2004. 679 с.
11. Infrared and Thermal Testing (IR) / editor P. O. Moore // Nondestructive Testing Handbook: 3rd ed. Vol. 3. ASNT, 2001. 732 p.
12. Petrov D. A., Karachinov V. A., Petrov A.V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of thermal imaging method of quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. 734. 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012058
13. Шергин С. С., Карачинов В. А., Осипова И. С. Исследование яркостного контраста профильной тепловой трубы в условиях диагностики качества // Вестник НовГУ. 2020. 5(121). 39-43. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.5(121).39-43
14. Petrov D. A., Karachinov V. A. Modeling the influence of heat sinks on the morphology of the temperature field of a profile heat pipe // Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2388. 012118. DOI:10.1088/1742-6596/2388/1/012118
15. Карачинов В. А. Патент № 2456524 Российская Федерация МПК F28D 15/02 (2006.01). Способ контроля качества тепловой трубы: № 2010152904/06: заявл. 23.10.2010: опубл. 20.07.2012 / заявитель ОФО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике» (ОАО «СКТБ РТ»).
16. Полия Г., Сеге Г. Изопериметрические неравенства в математической

физике / перевод с английского. Москва: URSS, 2006. 336 с.

17. Коробко В. И., Коробко А. В. Количественная оценка симметрии. Москва: АСВ, 2008. 128 с.

18. Коробко А. В., Шляхов С. В., Лыгина Ю. Е. Определение значений коэффициента формы плоских областей с выпуклым контуром в виде частей круга // Строительство и реконструкция. 2017. 6(74). 13-21.

References

1. Dan P. D., Ray D. A. Teplovyye truby [Heat pipes]. Moscow: Energiya, 1979. 272 p.
2. Dulnev G. N., Belyakov A. P. Teplovyye truby v elektronnykh sistemakh stabilizatsii temperatury [Heat pipes in electronic temperature stabilization systems]. Moscow: Radio and Communications, 1985. 96 p.
3. Karachinov V. A. Zashchita RES v ekstremal'nykh usloviyakh. Spetsial'nyye ustroystva okhlazhdeniya: uchebnoye posobiye [Protection of RES in extreme conditions. Special cooling devices. A study guide]. Veliky Novgorod, Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, 2007. 176 p.
4. Ivanovsky M. N., Sorokin V. P., Chulkov B. A., Yagodkin I. V. Tekhnologicheskiye osnovy teplovykh trub [Technological foundations of heat pipes]. Moscow: Atomizdat, 1980. 160 p.
5. Luks, A. L., Matveev A. G. Issledovaniye vysokoeffektivnykh ammiachnykh teplovykh trub energosberegayushchikh sistem termoregulirovaniya krupnogabaritnykh konstruktsiy kosmicheskogo apparata [Investigation of highly efficient ammonia heat pipes of energy-saving thermal control systems for large-sized spacecraft structures] // Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2007. 6(56). 401-418.
6. Derevyank V. A., Nesterov D. A., Kosenko V. E., Zvonar V. D., Chebotarev V. E., Fatkulov R. F., Suntsov S. B. Ploskiye teplovyye truby dlya otvoda tepla ot elektronnoy apparatury v kosmicheskikh apparatakh [Flat heat pipes for heat removal from electronic equipment in space vehicles] // Bulletin of SibGAU. 2013. 6(52). 111-116.
7. Karachinov V. A., Petrov D. A., Kiliba Yu. V. [Analysis of quality control methods for heat pipes] // Vestnik NovSU. 2019. 2(114). 14-18.
8. Karachinov V. A., Kiliba Yu. V., Petrov D. A., Ionov A. S. Patent No. 2685804 the Russian Federation IPC F28D 15/02 Sposob kontrolya kachestva teplovoy truby [Method for quality control of a heat pipe] No. 2019136400: application 11.12.2019: publ. 23.04.2019 / applicant JSC OKB-Planeta. 9 p.
9. Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Petrov D. A., Evstigneev D. A. Patent No. 2724316 Russian Federation IPC G01M 3/20 (2006.01). Sposob kontrolya kachestva ammiachnoy teplovoy truby [Method for quality control of ammonia heat pipe] No. 2019136400: application 11.12.2019: publ. 22.06.2020 / applicant JSC OKB-Planeta.
10. Nerazrushayushchiy kontrol' [Non-destructive testing]: reference book: in 7 volumes under the general editorship of V. V. Klyuev. Vol. 5: in 2 books. Book 1: Thermal control. / V. P. Vavilov. Moscow: Mashinostroenie, 2004. 679 p.
11. Infrared and Thermal Testing (IR) / editor P. O. Moore // Nondestructive Testing Handbook: 3rd ed. Vol. 3. ASNT, 2001. 732 p.
12. Petrov D. A., Karachinov V. A., Petrov A. V., Ionov A. S., Evstigneev D. A. Features of thermal imaging method of quality control of profile heat pipes // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. 734, N 1. 012058. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012058
13. Shergin S. S., Karachinov V. A., Osipova I. S. Issledovaniye yarkostnogo kontrasta profil'noy teplovoy truby v usloviyakh diagnostiki kachestva [The study of

brightness contrast of a profile heat pipe in the conditions of quality diagnostics] // Vestnik NovSU. 2020. 5(121). 39-43. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.5(121).39-43

14. Petrov D. A., Karachinov V. A. Modeling the influence of heat sinks on the morphology of the temperature field of a profile heat pipe. Journal of Physics: Conference Series. 2022. 2388. 012118. DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012118

15. Karachinov V. A. Patent No. 2456524 Russian Federation IPC F28D 15/02 (2006.01). Sposob kontrolya kachestva teplovoy trubyy [Heat pipe quality control method]: No. 2010152904/06: application 23.10.2010: publ. 20.07.2012 / applicant Joint Stock Company "Special Design and Technology Bureau by relay technology" (JSC "SKTB RT").

16. Polia G and Sege G Izoperimetricheskiye neravenstva v matematicheskoy fizike [Isoperimetric inequalities in mathematical physics] / translated from English. Moscow: URSS, 2006. 336 p.

17. Korobko V. I., Korobko A. V. Kolichestvennaya otsenka simmetrii [Quantitative assessment of symmetry]. Moscow: ASV, 2008. 128 p.

18. Korobko A.V., Shlyakhov S.V., Lygina Yu.E. Opredeleniye znacheniy koeffitsiyenta formy ploskikh oblastey s vypuklym konturom v vide chastey kruga [Determination of the values of the shape coefficient of flat areas with a convex contour in the form of parts of a circle] // Construction and reconstruction. 2017. 6(74). 13-21.

Информация об авторах

Шергин Степан Сергеевич – инженер-конструктор, АО «Аскольд» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-3250-1929, stepan.shergin@mail.ru

Скрыпов Михаил Андреевич – сотрудник, НПО «КВАНТ» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0003-3816-3147, iellariahe@yandex.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 536-12

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).123-127

ГРНТИ 29.17.43

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТЖИГА ДЛЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

Гордей М. М.^{1, 2}, Метлов Л. С.^{1, 2}

¹ Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)

² Донецкий государственный университет (Донецк, Россия)

Аннотация Теоретически проанализирована кривая, демонстрирующая зависимость количества серебра в зернах меди от температуры отжига, составленная в процессе отжига при различных температурах. Предпринята попытка разработки модели на основе подхода неравновесной эволюционной термодинамики для описания процесса отжига. Данная модель протестирована при помощи компьютерного моделирования. С учетом ранее разработанной модели для мегапластической деформации в рамках неравновесной эволюционной термодинамики, был полностью смоделирован эксперимент, который состоял из отжига и дальнейшей обработки методом пластической деформации кручением.

Ключевые слова: модель отжига, свободная энергия, компьютерное моделирование, эволюционное уравнение

Для цитирования: Гордей М. М., Метлов Л. С. Разработка теоретической модели отжига для двухкомпонентных систем // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 123-127. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).123-127

Research Article

DEVELOPMENT OF THE THEORETICAL ANNEALING MODEL FOR TWO-COMPONENT SYSTEMS

Gordei M. M.^{1, 2}, Metlov L. S.^{1, 2}

¹ Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering (Donetsk, Russia)

² Donetsk State University (Donetsk, Russia)

Abstract The curve showing dependence of amount of silver in copper grains on the annealing temperature, compiled during the annealing process at different temperature has been theoretically analyzed. An attempt to develop a model based on the approach of nonequilibrium evolutionary thermodynamics to describe the annealing process was made. This model has been tested using computer simulation. Taking the previously developed model for megaplastic deformation within the framework of nonequilibrium evolutionary thermodynamics into account, the experiment was fully simulated, which consisted of annealing and further processing by plastic torsion deformation.

Keywords: annealing model, free energy, computer simulation, evolution equation

For citation: Metlov L. S., Gordei M. M. Development of the theoretical annealing model for two-component systems // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 123-127. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).123-127

Введение

В ранних работах авторов [1] была поставлена задача построения и проведения компьютерных экспериментов для теоретической модели, описывающей проведение мегапластической деформации и отжига для двухкомпонентной системы. Согласно эксперименту, проведенному в работе [2], в качестве материала для исследования использовался сплав Cu-Ag. В ходе проведения эксперимента, было обнаружено явление, при котором, вследствие обработки пластической деформации кручением, количество растворенного серебра в зернах меди выходило на некоторое стационарное состояние. Данное состояние не зависело от начального количества серебра в зернах меди.

Для решения первой части задачи была разработана теоретическая модель на основе неравновесной эволюционной термодинамики [1], результаты компьютерного моделирования которой совпадали с экспериментом. Попытка решения второй части задачи была предложена в работе [3]. Однако не были уточнены некоторые особенности теоретической модели отжига и проведено соответствующее компьютерное моделирование.

Основная часть

Для построения теоретической модели отжига двухкомпонентного сплава будем пользоваться тем же подходом, который использовался для разработки модели мегапластической деформации на основе неравновесной эволюционной термодинамики.

Будем рассматривать атомы легирующего компонента в матрице основного в качестве точечных дефектов. В качестве термодинамического потенциала будем использовать свободную энергию. Данный выбор обусловлен тем, что изменения происходят в отсутствие внешнего воздействия, например, отсутствует механическое воздействие.

В таком случае, можем представить свободную энергию в качестве разложения по степеням концентрации. Ограничимся второй степенью полинома

$$F = F_0 + ac - \frac{b}{2}c^2, \quad (1)$$

где F_0 – свободная энергия сплава без учета возможности растворения атомов легирующего компонента, c – концентрация растворенного атома, a , b – некоторые коэффициенты разложения, зависящие от температуры.

В уравнении (1), второе и третье слагаемое, моделируют, соответственно, стоки в основную фазу и источник атомов легирующего компонента в твердом растворе.

Это обусловлено тем, что в состоянии равновесия сплав представляет собой двухфазную систему, состоящую из зерен двух компонентов. При этом часть атомов

серебра, растворяется в меди, и, наоборот, медь растворяется в фазе серебра. Часть растворенных атомов вследствие диффузии будет возвращаться в основную фазу. Таким образом, в системе установится два взаимно противоположно направленных потока, и в состоянии равновесия эти потоки будут равны между собой. Если начальное состояние сплава отличается от равновесного, то в результате отжига система в асимптоте переходит в равновесное состояние.

В качестве эволюционного уравнения для описания изменения концентрации легирующего компонента будем использовать уравнение Ландау-Халатникова

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \gamma \frac{\partial F}{\partial c}, \quad (2)$$

где γ – некоторый кинетический коэффициент.

Подставляя уравнение для свободной энергии, после его дифференцирования, получим

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \gamma(a - bc). \quad (3)$$

Соответственно, равновесные значения концентрации легирующего компонента будут определяться как

$$c = \frac{2a}{b}. \quad (4)$$

Для лучшей передачи формы кривой отжига, учитывая, что $a = a(T)$ и $b = b(T)$, можем представить данные коэффициенты в виде полинома

$$\begin{aligned} a &= \alpha_0 - \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 - \alpha_3 T^3 \\ b &= \beta_0 + \beta_1 T - \beta_2 T^2 + \beta_3 T^3 \end{aligned} \quad (5)$$

Используя уравнение (3-5) можем рассчитать эволюцию концентрации легирующего компонента в процессе отжига для различных температур (рисунок 1). Для решения данного уравнения будем использовать численные методы, а именно, метод Эйлера.

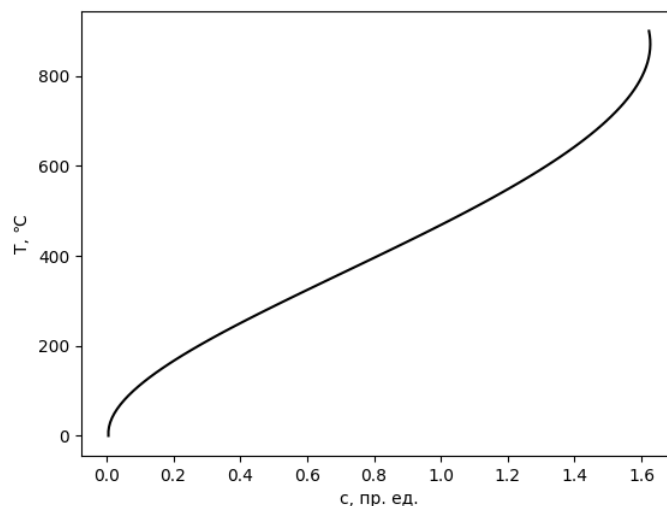


Рисунок 1. Кривая отображающая зависимость равновесной концентрации от температуры

Используя модель для мегапластической деформации, разработанную в работе [1], можем смоделировать выход системы на некоторое стационарное состояние (рисунок 2).

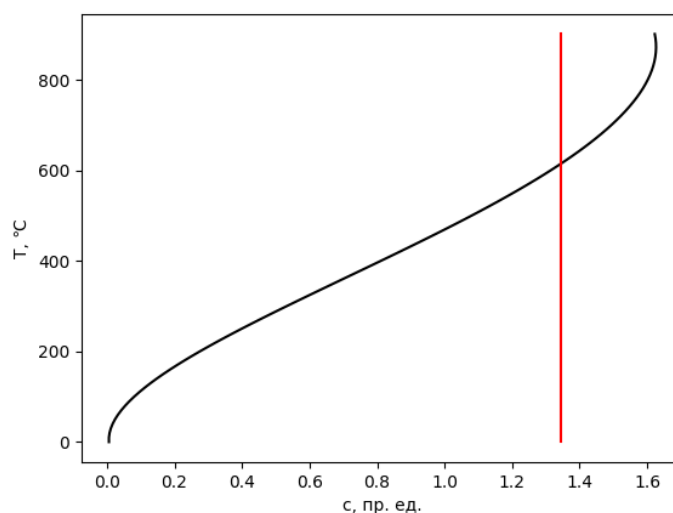


Рисунок 2. Фазовая диаграмма легирующего компонента в процессе МПД: черная линия - кривая отжига сплава; красная линия - стационарное состояние (после МПД)

Заключение

В рамках подхода на основе неравновесной эволюционной термодинамики была построена модель для описания отжига двухкомпонентных сплавов. Также, используя модель для мегапластической деформации, был полностью смоделирован эксперимент из работы [2]. Однако для большего согласования с экспериментальными данными, необходимо уточнение коэффициентов разложения.

Список литературы

1. Metlov L. S., Gordey M. M. Nonequilibrium evolution thermodynamic of poly- and two-components alloys affected by severe plastic deformation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012026
2. Straumal B. B., Kilmametov A. R., Baretzky B., Kogtenkova O. A., Straumal P. B., Lityńska-Dobrzyńska L., Chulist R., Korneva A., Zieba P. High pressure torsion of Cu-Ag and Cu-Sn alloys: Limits for solubility and dissolution // Acta Materialia. 2020. 195(4). 184-198. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.05.055
3. Метлов Л. С., Гордей М. М. Метод теоретического построения температурной кривой отжига для двухкомпонентного сплава // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы VIII Международной научной конференции, Донецк, 25–27 октября 2023 года. Т. 2: Физические, технические и компьютерные науки. Донецк: Донецкий государственный университет, 2023. С. 135-137.

References

1. Metlov L. S., Gordey M. M. Nonequilibrium evolution thermodynamic of poly- and two-components alloys affected by severe plastic deformation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012026
2. Straumal B. B., Kilmametov A. R., Baretzky B., Kogtenkova O. A., Straumal P. B., Lityńska-Dobrzyńska L., Chulist R., Korneva A., Zieba P. High pressure torsion of Cu-Ag and Cu-Sn alloys: Limits for solubility and dissolution // Acta Materialia. 2020. 195(4). 184-198. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.05.055
3. Metlov L. S., Gordey M. M. Metod teoreticheskogo postroyeniya temperaturnoy krivoy otzhiga dlya dvukhkomponentnogo splava [Method for theoretically constructing an annealing temperature curve for a two-component alloy] // Donetsk Readings 2023: education, science, innovation, culture and challenges of our time: Materials of the VIII International Scientific Conference. Donetsk, October 25-27, 2023 Vol. 2: Physical, technical and computer sciences. Donetsk: Donetsk National University, 2023. P. 135-137.

Информация об авторах

Гордей Максим Михайлович – студент, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия); инженер, Донецкий государственный университет (Донецк, Россия), ORCID: 0009-0008-6187-0612, gordei-maksim@mail.ru

Метлов Леонид Семенович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), профессор, Донецкий государственный университет (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0003-2876-0768, lsmet@donfti.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.9

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).128-136

ГРНТИ 29.19.03

Специальность ВАК 1.3.8; 1.3.4

Научная статья

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ВАКАНСИЙ

Метлов Л. С.

*Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия)
Донецкий национальный университет (Донецк, Россия)*

Аннотация Показано, что процесс генерации вакансий всегда носит неравновесный характер и может протекать по двум каналам, первый из которых связан с тепловым флуктуационным механизмом, второй с пластическим движением и генерацией дефектом более высокого масштабного уровня.

Ключевые слова: вакансии, тепловые флуктуации, неравновесные процессы, стационарное состояние, термодинамика

Для цитирования: Метлов Л. С. Некоторые аспекты неравновесной эволюционной термодинамики вакансий // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 128-136. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).128-136

Research Article

SOME ASPECTS OF THE NONEQUILIBRIUM EVOLUTION THERMODYNAMICS FOR VACANCIES

Metlov L. S.

*Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, Russia
Donetsk National University, Donetsk, Russia*

Abstract It is shown that the process of vacancy generation is always nonequilibrium in nature and can proceed through two channels, the first of which is associated with a thermal fluctuation mechanism, the second with plastic movement and generation by a defect of a higher scale level.

Keywords: vacancies, thermal fluctuations, nonequilibrium processes, stationary states, thermodynamics

For citation: Metlov L. S. Some aspects of the nonequilibrium evolution thermodynamics for vacancies // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 128-136. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).128-136

Введение

В иерархии структурных дефектов кристаллической решетки имеется несколько масштабных уровней – дефекты атомарного уровня (вакансии, межузельные атомы), линейные дефекты (дислокации, дисклинации), а также плоскостные дефекты (границы зерен) [1]. Однако, только дефекты атомарного уровня могут возникать и аннигилировать в результате тепловых флуктуаций, и, следовательно, их количество может регулироваться тепловым движением, и при каждой конкретной температуре может существовать вполне определенное равновесное количество этих дефектов. Подобного нельзя сказать о дефектах более высокого масштабного уровня, дислокациях и границах зерен. Эти дефекты, в принципе, не могут возникнуть

или исчезнуть в результате тепловых флуктуаций, последние могут за счет атомарной диффузии лишь немного изменить их общее количество, которое при каждой конкретной температуре может быть, в принципе, любым.

Во второй половине предыдущего столетия были предложены специальные технологии изменения количества дефектов высокого структурного уровня методами интенсивной (мега)пластической деформации (МПД), а именно, равноканального углового прессования [2-4], кручения в камерах Бриджмена или кручения под высоким давлением [5-8], винтовой экструзии [9-11] и т.д. Важным является то, что с ростом пластической деформации количество структурных дефектов всех типов также увеличивается, однако при достижении некоторого достаточно большого уровня пластической деформации их количество стабилизируется и перестает меняться. Структура обрабатываемого материала достигает своего предельного [12, 13] или стационарного состояния [14, 15].

Равновесное состояние вакансий в рамках конфигурационной энтропии

Считается, что процессы генерации и аннигиляции масштабных структурных дефектов, имеющие место при большой (мега) пластической деформации (МПД), являются сильнонеравновесными и для их описания неприменимы методы равновесной термодинамики. Согласно нашим представлениям, само понятие сильнонеравновесного процесса в этом случае теряет смысл, ибо здесь мы сталкиваемся с принципиально новой реальией, а именно, в процессе МПД система стремится к некоторому универсальному для данных условий стационарному, а не равновесному состоянию. После прекращения МПД система, действительно, в результате поатомной диффузии и теплообмена скатывается к некоторому ближайшему равновесному с точки зрения классической термодинамики состоянию.

В то же время, это равновесное состояние отличается от такового же состояния до МПД лишь тем, что вследствие накопленного уровня структурных дефектов, тело изменило свои физические свойства, и равновесие осуществляется уже при достигнутом уровне структурных дефектов. Тело никогда уже спонтанно, даже в гипотетическом будущем, не вернется к исходному своему равновесному состоянию. Плотность масштабных структурных дефектов никогда уже не отыграет полностью назад, к тому значению, которое она имела до МПД. Тем не менее, сами принципы описания равновесной термодинамики вполне могут быть применены и здесь посредством введения новых внутренних переменных состояния.

Как известно, установление термодинамического равновесия осуществляется в результате теплового движения атомов, которое в этом смысле играет фундаментальную роль. Эволюция системы из произвольного начального состояния, в общем случае неравновесного, к равновесному состоянию и выравнивание градиентов осуществляется за счет потоков энергии и импульса. При этом атомы взаимодействуют между собой по волновому механизму, колеблясь

вокруг своих положений равновесия без изменения кристаллографической структуры материала.

Однако, вследствие неравномерного и случайного характера волнового движения, часть атомов может покинуть кристаллографические положения равновесия и перейти в междоузельное пространство, образуя два вида точечных дефектов – вакансии и междоузельные атомы. Наличие вакансий существенно ускоряет процесс массопереноса по диффузионному поатомному механизму (вместо одновременного обмена местами двух атомов). Можно сказать, что движение (диффузионное) вакансий является неотъемлемой составляющей общего фундаментального теплового движения. Наличие вакансий влияет не только на процесс установления теплового равновесия, но и на само состояние равновесия. При заданной температуре в равновесном состоянии (в среднем) может существовать вполне определенное количество вакансий.

Включенность точечных дефектов в процессы тепловой релаксации определяется постулатом Больцмана, устанавливающим эквивалентность базовой характеристики теплового движения (конфигурационной) энтропии и структурной характеристики материала количества вакансий [16]

$$S_c = \ln \frac{N!}{(N-n)!n!}, \quad (1)$$

где N – общее число узлов кристаллической решетки, включая и пустые места, n – число пустых узлов (вакансий). Здесь энтропия выражена в безразмерных единицах. Отметим, что при таком определении конфигурационная энтропия является однозначной функцией количества вакансий [16, 17]. Это позволяет использовать в определяющих соотношениях вместо нее плотность структурных дефектов, как некоторый аналог энтропии. Действительно, полагая $N \gg n \gg 1$, в линейном приближении получим

$$S_c = k_M n, \quad (2)$$

где k_M – некоторая масштабная константа, равная

$$k_M = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k}. \quad (3)$$

Внутреннюю энергию U , зависящую от количества вакансий n , можно представить в виде ряда [17]

$$U = U_0 + \sum_{k=1}^K \frac{(-1)^{k-1}}{k} u_{k-1} n^k, \quad (4)$$

где U_0 – внутренняя энергия бездефектного твердого тела, u_{k-1} – некоторые коэффициенты, K – наибольшая учитываемая степень приближения. Здесь коэффициент u_0 имеет смысл энергии отдельной изолированной вакансии,

коэффициент u_1 отвечает за уменьшение этой энергии из-за взаимодействия с другими вакансиями и т. д.

Равновесная энергия вакансии (химический потенциал) равна

$$u \equiv \frac{\partial U}{\partial n} = \sum_{k=1}^K (-1)^{k-1} u_{k-1} n^{k-1} \quad (5)$$

Конфигурационная свободная энергия в таком представлении имеет вид

$$F_c = U - TS_c = U_0 + \sum_{k=1}^K \frac{(-1)^{k-1}}{k} u_{k-1} n^k - TK_M n + \dots, \quad (6)$$

где конфигурационная энтропия явно учтена только в первом приближении.

Чтобы эта свободная энергия имела минимум в равновесном состоянии необходимо, чтобы ее разложение начиналось с квадратичных вкладов, откуда следует, что

$$u_0 = TK_M. \quad (7)$$

Выражая температуру в энергетических единицах θ получим

$$u_0 = \theta \frac{K_M}{K_B}. \quad (8)$$

где K_B – постоянная Больцмана.

То есть, при нуле температур $\theta = 0$ – энергия одинокой вакансии равна нулю, в то же время хорошо известно, что энергия вакансии при нуле температур равна энергии разорванных связей и не равна нулю. Таким образом, мы пришли к противоречию, которое обуславливается рядом обстоятельств.

Во-первых, определение конфигурационной энтропии согласно (1) не зависит явно от температуры. Теорема Нерста выполняется только при условии $n = 0$. Это возможно только, если предположить, что именно это значение количества вакансий, точнее их полное отсутствие, будет устанавливаться при абсолютном нуле, обусловленное, возможно, неявной зависимостью энтропии от температуры через равновесное значение количества вакансий. В то же время, равновесное значение вакансий реализуется через диффузию, которая снижается при низких температурах. Следовательно, нулевое количество вакансий никогда не будет достигнуто за конечный промежуток времени при абсолютном нуле температур. Скорее, можно считать, что любое количество вакансий может быть заморожено и при нулевой температуре и энтропия никогда не будет равна нулю.

Вторая особенность классической процедуры поиска равновесных значений количества вакансий заключается в том, что оно отыскивается, как минимум свободной энергии по количеству вакансий, в то время как оно должно отыскиваться, как минимум свободной энергии по собственной независимой переменной

свободной энергии, то есть по температуре. Проводя ту аналогию, чтобы в качестве энтропии использовать количество дефектов, как независимую переменную внутренней энергии, а вместо температуры энергию вакансии как независимую переменную свободной энергии после преобразования Лежандра

$$\tilde{F}_c(u) = U(n) - un, \quad (9)$$

получим условие минимума свободной энергии

$$\frac{\partial \tilde{F}_c(u)}{\partial u} = \frac{\partial U(n)}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial u} - n - u \frac{\partial n}{\partial u} = 0, \quad (10)$$

Откуда с учетом определения (5) получим

$$n \equiv 0, \quad (11)$$

то есть, в равновесном состоянии согласно такому определению свободной энергии (9) в рамках чисто термодинамического рассмотрения вакансии должны отсутствовать в твердом теле. Реальное существование вакансий в таком случае объясняются выходом за рамки чисто термодинамического рассмотрения, и связано с генерацией вакансий вследствие тепловых флуктуаций, а в “равновесном” состоянии балансом между их генерацией и аннигиляцией.

«Равновесное» состояние вакансий в рамках неравновесной эволюционной термодинамики

По сути, процесс генерации вакансий является неравновесным, а “равновесное” состояние является, по сути, стационарным состоянием. Для описания таких процессов ранее был предложен метод неравновесной эволюционной термодинамики (НЭТ) [15, 17] для сильнонеравновесных процессов при большой пластической деформации. Здесь источником для энергии структурных дефектов при их генерации является внешняя работа пластического течения, а условием стационарности максимум неравновесного термодинамического потенциала в форме эффективной внутренней энергии [17].

По сути дела процесс генерации вакансий в отсутствии пластического течения ничем принципиально не отличается от рассмотренного выше за тем исключением, что энергия вакансий черпается из теплового движения. Флуктуации генерируют вакансии, как объекты с повышенной энергией, на что уходит некоторое количество тепловой энергии, которая восполняется ее притоком из внешнего термостата. При наличии пластического течения происходит то же самое, но только гораздо с большей интенсивностью и скоростью за счет работы внешних сил.

Внутренняя энергия (4) в квадратичном приближении

$$U = U_0 + u_0 n - \frac{1}{2} u_1 n^2 + \dots, \quad (12)$$

а энергия вакансии (5)

$$u \equiv \frac{\partial U}{\partial n} = u_0 - u_1 n + \dots \quad (13)$$

Соответствующее эволюционное уравнение для количества вакансий [17]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial U}{\partial n} - u_{st} \right) \quad (14)$$

Отсюда стационарная точка, соответствующая экстремуму (максимуму) эффективной внутренней энергии [17],

$$U_{ef} = U + u_{st} n \quad (15)$$

дает условие для нахождения стационарного (“равновесного”) количества вакансий

$$n_{st} = \frac{u_0 - u_{st}}{u_1} > 0 \quad (16)$$

поскольку $u_0 > u_{st}$, то есть, энергия изолированной вакансии выше энергии стационарного значения.

Если процесс генерации вакансий реализуется только за счет энергии теплового движения, то найденное стационарное значение количества вакансий (16) будет равно числу вакансий, которое традиционно считалось равновесным. Если же вклад вносит также механизмы генерации вакансий, связанные с пластическим движением, то константы теории будут зависеть от характеристик этого движения, в частности от действующих напряжений, Например,

$$n_0 = n_0^* + n_0^{**} \tau, \quad (17)$$

где T – сдвиговое напряжение, равное пределу пластического течения. При значительных сдвиговых напряжениях коэффициент n_0 будет большим, чем без пластического течения, что соответственно приведет к ситуации, когда число “неравновесных” вакансий будет значительно выше, чем «равновесных».

Отметим, что сами по себе вакансии мало чувствительны к действующим напряжениям, поэтому их не следует рассматривать в отрыве от других типов дефектов большего масштаба, таких, как дислокации, границы зерен, дисклинации и т.д. через взаимодействие с которыми они и будут генерироваться в больших количествах (как сопровождающее явление). Наоборот, дефекты большего масштаба не могут быть сгенерированы за счет теплового движения в результате флуктуаций и для них единственным механизмом генерации будет большое пластическое движение.

Заключение

Таким образом, в статье показано, что процесс генерации вакансий всегда носит неравновесный характер и может протекать по двум каналам. Первый канал связан с тепловым флуктуационным механизмом, второй с пластическим движением. В первом случае энергия вакансий при заданной температуре в процессе их возникновения пополняется в конечном итоге за счет притока ее от внешних термостатов, во втором случае – за счет работы внешних сил и генерации дефектов более высокого масштабного уровня. В случае дефектов большего масштаба, дислокаций, границ зерен, дисклинаций и т.д. работает только один канал, связанный с пластическим движением.

Список литературы

1. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. И., Зуев Л. Б., Егорушкин В. Е., Елсукова Т. Ф., Конева Н. А., Козлов Э. В., Полетика Т. М., Кульков С. М., Псахье С. Г., Корестелев С. Ю., Чертова Н. В. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 1990. 251 с.
2. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И., Павлик Д. А., Малышев В. Ф., Степаненко А. В. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 230 с.
3. Segal V. M. Metal processing by severe plastic deformation // Russian Metallurgy (Metally). 2006. 5. 474-483. DOI: 10.1134/S003602950605017X
4. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement // Progress in Materials Science. 2006. 51(7). 881-981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003
5. Bridgman P. W. Effect of high Shearing Stress Combined with High Hydrostatic pressure // Physical Review. 1935. 48(10). 825-848. DOI: 10.1103/physrev.48.825
6. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-Pressure Torsion for Metal Processing: Fundamentals and Applications // Progress in Material Science. 2008. 53(6). 893-979. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.03.002
7. Sundeev R. V., Glezer A. M., Menushenkov A. P., Shalimova A. V., Chernysheva O. V., Umnova N. V. Effect of high pressure torsion at different temperatures on the local atomic structure of amorphous Fe-Ni-B alloys // Materials and Design. 2017. 135(8). 77-83. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.062
8. Glezer A. M., Luzgin D. V., Muradimova L. F., Shirshikov S. O., Libman V. A., Schetinin I. V., Perov N. S., Dyakonov D. L., Sundeyev R. V. Structural phase changes during deformation of FeCo-V alloys by torsion under high pressure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 709. 044091. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044091
9. Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Сынков С. Г., Сапронов А. Н., Сынков В. Г. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии // Физика и техника высоких давлений. 1999. 9(3). 109-111.
10. Beygelzimer Y., Varyukhin V., Orlov D., Efros B., Stolyarov V., Salimgareyev H. Microstructural evolution of titanium under twist extrusion // TMS Annual Meeting and Exhibition / Eds. Y. T. Zhu, T. G. Langdon, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, M. J. Saran, T. C. Lowe. Seattle, WA, United States Duration, 2002. P. 43-46.
11. Beygelzimer Y., Kulagin R., Estrin Y., Toth L. S., Kim H. S., Latypov M. I. Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review: Twist

Extrusion as a Potent Tool for Obtaining // *Advanced Engineering Materials*. 2017. 19(8). 1600873. DOI: 10.1002/adem.201600873

12. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. Москва: Металлургия, 1986. 224 с.

13. Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. Донецк: Фирма ФЕАН, 2003. 87 с.

14. Metlov L. S. Nonequilibrium dynamics of a two-defect system under severe load // *Physical Review E*. 2014. 90(2-1). 022124(8). DOI: 10.1103/PhysRevE.90.022124

15. Straumal B. B., Kilmametova A. R., Baretzky B., Kogtenkova O. A., Straumal P. B., Litynska-Dobrzynska L., Chulist R., Korneva A., Zieba P. High pressure torsion of Cu Ag and Cu Sn alloys: Limits for solubility and dissolution // *Acta Materialia*. 2020. 195. 184-198. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.05.055

16. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1975. 592 с.

17. Metlov L. S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies. // *Physical Review Letters*. 2011. 106(16). 165506. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

References

1. Panin V. E., Grinyaev Yu. V., Danilov V. I., Zuev L. B., Egorushkin V. E., Elsukova T. F., Koneva Y. A., Kozlov E. V., Poletika T. V., Kul'kov S. M., Psakh'e S. G., Korestev S. Yu., Chertova N. V. *Strukturnyye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformations and distructions]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoye otdeleniye. 1990. 255 p.

2. Segal V. M., Reznikov V. I., Kopylov V. I. *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov* [Processis of plastic structure-formation of metals]. Minsk: Science and Technology", 1994. 232 p.

3. Segal V. M. Metal processing by severe plastic deformation // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2006. 5. 474-483. DOI: 10.1134/S003602950605017X

4. Valiev R. Z., Langdon T. G. Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement // *Progress in Materials Science*. 2006. 51(7). 881-981. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003

5. Bridgman P. W. Effect of high Shearing Stress Combined with High Hydrostatic pressure // *Physical Review*. 1935. 48(10). 825-848. DOI: 10.1103/physrev.48.825

6. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-Pressure Torsion for Metal Processing: Fundamentals and Applications // *Progress in Material Science*. 2008. 53(6). 893-979. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.03.002

7. Sundeev R. V., Glezer A. M., Menushenkov A. P., Shalimova A. V., Chernysheva O. V., Umnova N. V. Effect of high pressure torsion at different temperatures on the local atomic structure of amorphous Fe-Ni-B alloys // *Materials and Design*. 2017. 135(8). 77-83. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.08.062

8. Glezer A. M., Luzgin D. V., Muradimova L. F., Shirshikov S. O., Libman V. A., Schetinin I. V., Perov N. S., Dyakonov D. L., Sundeyev R. V. Structural phase changes during deformation of FeCo-V alloys by torsion under high pressure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 709. 044091. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044091

9. Beygelzimer Ya, Varyukhin V., Synkov S., Saprionov A., Synkov V. *Novyye skhemy nakopleniya bol'shikh plasticheskikh deformatsiy s ispolbzoaniyem gidroekstruzii* [New Schemes of accumulation of large plastic deformation with the use of hydroextrusion] // *Physics and high pressure technology* 1999. 9(3). 109-111.

10. Beygelzimer Y., Varyukhin V., Orlov D., Efros B., Stolyarov V., Salimgareyev H. Microstructural evolution of titanium under twist extrusion // TMS Annual Meeting and Exhibition / Eds. Y. T. Zhu, T. G. Langdon, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, M. J. Saran, T. C. Lowe. Seattle, WA, United States Duration, 2002. P. 43-46.
11. Beygelzimer Y., Kulagin R., Estrin Y., Toth L. S., Kim H. S., Latypov M. I. Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review: Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining // Advanced Engineering Materials. 2017. 19(8). 1600873. DOI: 10.1002/adem.201600873
12. Rybin V. V. Bol'shiye plasticheskiye deformatsii i razrusheniye metallov [Plastic Deformation and Fracture of Metals]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 224 p.
13. Beygelzimer Ya. E., Varyukhin V. N., Orlov D. V., Synkov S. G. Vintovaya ekstruziya – protsess nakopleniya deformatsiy [Twist extrusion as deformation accumulations process]. Donetsk: Firma FEAN, 2003. 87 p.
14. Metlov L. S. Nonequilibrium dynamics of a two-defect system under severe load // Physical Review E. 2014. 90(2-1). 022124(8). DOI: 10.1103/PhysRevE.90.022124
15. Straumal B. B., Kilametova A. R., Baretzky B., Kogtenkova O. A., Straumal P. B., Litynska-Dobrzynska L., Chulist R., Korneva A., Zieba P. High pressure torsion of Cu Ag and Cu Sn alloys: Limits for solubility and dissolution // Acta Materialia. 2020. 195. 184-198. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.05.055
16. Frenkel Ya. I. Kineticheskaya teoriya zhidkostey [Kinetic theory of liquids]. Leningrad: Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1975. 592 p.
17. Metlov L. S. Nonequilibrium evolution thermodynamics of vacancies. // Physical Review Letters. 2011. 106(16). 165506. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.165506

Информация об авторах

Метлов Леонид Семенович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Донецкий физико-технический институт имени А. А. Галкина (Донецк, Россия), профессор, Донецкий государственный университет (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0003-2876-0768, lsmet@donfti.ru

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.955

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).137-153

ГРНТИ 29.19.37

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СЛОИСТОЙ МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЫ В НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ В ОБЛАСТИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Никитин А. О.

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В работе на основе дисперсионных характеристик спиновых волн и теории магнитоэлектрического эффекта строится математическая модель поведения мультиферроидной структуры в неоднородном электрическом поле. Учитывается природа обменного взаимодействия, также рассматриваются обменные граничные условия Радо-Уиртмана на основе представления их в терминах плотности свободной энергии. На основе построенной математической модели оценивается вклад в дисперсионную картину спиновых волн внешнего электрического поля разной полярности. В заключении приводится ряд случаев применения построенной математической модели при проектировании электронно-управляемых устройств направленного распространения спиновых волн, а также базовых устройств для нейроморфных вычислений.

Ключевые слова: *спиновые волны, магнитоэлектрический эффект, мультиферроидные структуры, дисперсионные характеристики*

Для цитирования: Никитин А. О. Математическая модель поведения слоистой мультиферроидной структуры в неоднородных электрических полях в области сверхвысоких частот // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 137-153. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).137-153

Research Article

MATHEMATICAL MODEL OF BEHAVIOR OF A LAYERED MULTIFERROIC STRUCTURE IN INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELDS IN THE MICROWAVE REGION

Nikitin A.O.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract In this work, based on the dispersion characteristics of spin waves and the theory of the magnetoelectric effect, a mathematical model of a multiferroic structure behavior in a non-uniform electric field is constructed. The nature of the exchange interaction is taken into account, and the Rado-Wirtman exchange boundary conditions are also considered based on their representation in terms of free energy density. Based on the constructed mathematical model, the contribution to the dispersion pattern of spin waves of an external electric field of different polarities is estimated. In conclusion, a number of cases of application of the constructed mathematical model in the design of electronically controlled devices for the directional propagation of spin waves, as well as basic devices for neuromorphic computing, are given.

Keywords: *spin waves, magnetoelectric effect, multiferroic structures, dispersion characteristics*

For citation: Nikitin A.O. Mathematical model of behavior of a layered multiferroic structure in inhomogeneous electric fields in the microwave region // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 137-153. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).137-153

Введение

Мультиферроидные структуры, с точки зрения исследователей ученых-фундаменталистов, техников и инженеров – богатые эффектами твердотельные структуры. И, некоторые из эффектов лежат на поверхностях, позволяя достаточно быстро перейти к их практическому применению, зачастую, без глубинного изучения самой физики процессов. Исследования эффектов на основе феноменологических моделей является для исследователей хорошим подспорьем. Забегая вперед, стоит отметить, что исследования магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в низкочастотной области как раз и относиться, в большей степени, к эмпирическому исследованию [1]. Здесь речь идет о проектировании датчиков магнитных полей, и как производные – датчики тока, где рождение теории сопровождалось проведением многочисленных экспериментов.

В свою очередь, мультиферроидные структуры являются продуктом преобладающих в физике второй половины XX столетия процессов. Одним из характерных для этого революционного, с научной точки зрения, периода стал процесс объединения различных физических явлений с целью поиска качественно новых эффектов. Вследствие подобного объединения выходная многофазная система приобретала один из возможных вариантов: эффекты сосуществовали отдельно в каждой из фаз, эффекты имели взаимное межфазное влияние с суммарным выходным эффектом, или же выходной эффект во много раз превышал отдельные, фазные, эффекты. В общем понимании, мультиферроиды – структуры, имеющие несколько типов упорядочений: магнитное, электрическое, механическое. А в частности, композитные структуры, содержащие ферритовые и сегнетоэлектрические компоненты, с момента своего появления являются центром научных интересов, т. к. на их основе стало возможным проектирование нового класса СВЧ устройств с возможностью как магнитной, так и сравнительно быстрой электрической перестройкой.

В работе [2] Vopson M.V. на основе дифференциального выражения свободной энергии Гиббса привел теоретическое описание мультиферроидных структур, подробно объясняющее механизмы проявления эффектов в подобных материалах:

$$dG = -SdT - x d\sigma - P dE - M dH, \quad (1)$$

где S – энтропия, T – температура, x – деформация, σ – внешнее приложенное механическое напряжение, P – поляризация, M – намагниченность, E , H – приложенные внешние электрическое и магнитное поля соответственно.

В случае изотермальной адиабатической системы, выражение (1) приобретало вид:

$$\begin{cases} x = s\sigma + d^e E + d^m H \\ P = d^{e,c} \sigma + \chi^e E + \alpha^m H \\ M = d^{m,c} \sigma + \alpha^e E + \chi^m H \end{cases} \quad (2)$$

где $d^e, d^{e,c}$ и $d^m, d^{m,c}$ – прямой и обратный пьезоэлектрический и магнитострикционный коэффициенты соответственно, $\chi^{e,m}$ – диэлектрическая и магнитная восприимчивости, $\alpha^{e,m}$ – магнитоэлектрический коэффициент.

Важным стоит отметить разделение мультиферроиков по типам. Отличительной их чертой является тот факт, что для первого типа характерна слабая (условно отсутствующая) зависимость электрического и магнитного упорядочений, а у второго типа электрическая поляризация появляется в силу действия магнитного упорядочения, и (или) наоборот. Также следует подчеркнуть еще одну классификацию мультиферроидных композитных структур, характерную для состоящих из сегнетоэлектрических и ферромагнитных фаз, которая связана с особенностями их применения: структуры, в которых свойства фаз используются в отдельности; структуры, в которых магнитные и сегнетоэлектрические свойства используются одновременно, но без взаимного их влияния; структуры, в которых магнитные и сегнетоэлектрические свойства связаны посредством магнитоэлектрического эффекта. Последний тип мультиферроидных структур называют магнитоэлектрические мультиферроидные структуры, или просто магнитоэлектрические структуры.

Магнитоэлектрический эффект представляет собой «вторичный» эффект в цепочке «магнитострикция – упругая деформация – пьезоэлектрический эффект» и проявляется в индуцировании электрической поляризации под действием магнитного поля, или наоборот, индуцировании намагниченности под действием электрического поля. В последнем случае мы имеем дело с обратным МЭ-эффектом, который в СВЧ диапазоне, в области ферромагнитного резонанса (ФМР) и определяет практический интерес. Стоит отметить, что история изучения МЭ эффекта и СВЧ МЭ устройств насчитывает не одно десятилетие. На сегодняшний день существует большое число работ, связанных с изучением как самого МЭ-эффекта в области ФМР, так устройств на МЭ эффекте: приемная микрополосковая антенна [3, 4] фильтр-преселектор [5], аттенюатор [6], фазовращатель [7], гиратор [8].

В процессе исследования электронно-управляемых МЭ СВЧ устройств было выявлено, что при управляемом воздействии электрического поля основное влияние на электродинамическую картину оказывает не только МЭ эффект, а существующая зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от величины приложенного электрического поля. В подтверждении данного факта было проведено теоретико-экспериментальное исследование [9], в котором на основе теоретического описания поведения МЭ структуры, при приложении электрического поля было осуществлено моделирование в программном пакете

электродинамического моделирования ANSYS HFSS. Результат моделирования имел высокую степень подобия с экспериментальными данными. В других источниках [10] также можно было бы найти сведения об ограниченном влиянии обратного МЭ эффекта на мультиферроидную структуру, в сравнении с возмущениями, вызванными прямым воздействием магнитного поля. Здесь же, как один из путей преодоления существующего ограничения МЭ эффекта, был отмечен гигантский магнитоэлектрический эффект, теоретическое описание которого представлено в [11].

В настоящем исследовании предлагается рассмотреть МЭ эффект, с другой стороны. В 2022 году была опубликован совместный труд, дорожная карта, которая затрагивает вопрос применения магнотных устройств в спинволновых (СВ) вычислениях [12]. Магнот – квант спиновой волны, и, следовательно, магнотика – наука, изучающая процессы распространения волн намагниченности, а также проектирование устройств на основе физики спиновых волн. Актуальность данной темы является следствием свойств присущих данному типу колебания: спиновые волны, в отличие электронов, не несут реальных частиц, а, следовательно, имеют низкое затухание, и, дополнительно, обладают высокой степенью масштабируемости и высокой скоростью сходимости. Последнее, в большей степени относится к вычислительным нейронным сетям, построенным на спиновых волнах.

В свой черед, спиновые волны, или волны намагниченности, относят к медленным типам волн, вследствие малого значения групповой скорости $\partial\omega/\partial k$. Однако, небольшая величина МЭ эффекта и малая групповая скорость в совокупности позволило перейти к эффективной прецизионной системе управления направлением распространения данного типа колебания. В более широком смысле, из-за малого значения групповой скорости, небольшое изменение внутреннего эффективного магнитного поля ферромагнитной фазы (за счет МЭ эффекта) приводит к небольшому сдвигу линии ФМР, в свою очередь это приводит к значительному изменению постоянной распространения (фазовой постоянной) спиновой волны, за счет существующей обратной зависимости. Похожий принцип лежит в основе электронно-управляемых МЭ СВЧ фазовращателей. Однако, в отличие от представленных МЭ СВЧ устройств, в которых прикладываемое к структуре электрическое поле вызывает сдвиг дисперсионной картины, за счет МЭ эффекта, данное исследование фокусируется построении модели поведения спиновых волн в неоднородном, имеющем градиентное распределение, электрическом поле, позволяющем создать электронно-управляемую структуру направленного распространения спиновых волн. Одна из последних работ [13] подтверждает подобную возможность, в которой был достигнут электронно-управляемый поворот фронта спиновой волны в 30 градусов.

Таким образом, целью данной работы является глубинное исследование мультиферроидных структур с точки зрения использования магнитоэлектрического

эффекта в качестве прецизионного инструмента управления направлением распространением спиновых волн.

Математическая модель поведения магнитоэлектрической структуры в неоднородных электрических полях

Вопросам построения дисперсионных характеристик собственных волн слоистых мультиферроидных структур посвящено большое число работ. В той или иной степени, они способны были описывать эффекты, существующие в данных типах структур.

При построении феноменологической теории колебаний и волн в многослойных пленочных структурах чаще всего используются два подхода. Эти подходы отличаются последовательностью совместного интегрирования уравнения движения намагниченности и уравнения Максвелла. Условно эти подходы называют: теория плоских волн и теория спин-волновых мод.

Теория спин волновых мод [14] представляет собой метод решения интегро-дифференциального уравнения, выводимого из совместного рассмотрения уравнений магнитостатики и линеаризованного уравнения движения намагниченности, с учетом электродинамических и обменных граничных условий. В этом интегро-дифференциальном уравнении, учтены как диполь-дипольное и обменное взаимодействие, анизотропия. Данный метод предоставляет возможность решения большого числа задач, однако, из-за сложности конечного дисперсионного уравнения, анализ промежуточных выводов и их связь с конечными результатами не является тривиальным.

Другой подход, условно названный теорией плоских волн строится на совместном решении уравнений Максвелла, взятых в магнитостатическом приближении, и уравнения движения намагниченности. Далее решение находится в виде разложения по плоским волнам. Данный метод был использован при решении электродинамической задачи МЭ градиентных структур [15].

Вместе с тем, объектом исследования являются спиновые волны, которые могут распространяться только по ферритовой фазе магнитоэлектрического композита, и не ставится задача рассмотрения эффектов, возникающих при взаимодействии ЭМВ и СВ, поэтому имеет смысл при построении модели использовать дисперсионные выражения описывающие только спиновые волны. И, с учетом того факта, что ставится задача управления направлением распространения спиновых волн в масштабе одного ферритового слоя, стоит воспользоваться классическими описанием спиновых волн [16]. Важно отметить, что указанные выше математические модели [14, 15] также способны описывать спиновые волны, со схожими результатами.

Для спиновых волн существует зависимость направления приложенного к структуре вектора магнитного поля H_{0e} и направления распространения спиновой

волны. Здесь имеет место рассмотрение трех предельных случаев: вектор магнитного поля направлен по нормали к плоскости структуры, вектор магнитного поля лежит в плоскости структуры и направлен вдоль распространения спиновой волны, и вектор магнитного поля лежит в плоскости структуры поперек направления распространения спиновой волны. Для этих трех случаев характерно существование разных типов спиновых волн, которые описываются своими дисперсионными характеристиками:

- H_{oe} направлен по нормали к плоскости структуры, существуют прямые объемные спиновые волны:

$$\tan \left[\frac{kd}{2} \sqrt{-(1+\chi)} - \frac{n\pi}{2} \right] = \frac{1}{\sqrt{-(1+\chi)}} \quad (3)$$

- H_{oe} лежит в плоскости структуры и направлен вдоль распространения спиновой волны, существуют обратные объемные спиновые волны:

$$\tan \left[\frac{kd}{2\sqrt{-(1+\chi)}} - \frac{(n-1)\pi}{2} \right] = \sqrt{-(1+\chi)}; \quad (4)$$

- H_{oe} лежит в плоскости структуры поперек направления распространения спиновой волны, существуют поверхностная спиновая волна:

$$\omega^2 = \omega_0(\omega_0 + \omega_M) + \frac{\omega_M^2}{4} [1 - e^{-2kd}]. \quad (5)$$

В выражениях (3), (4), (5): k – постоянная распространения спиновой волны, d – толщина ферромагнетика, χ и κ – диагональный и недиагональный компоненты тензора восприимчивости Польдера:

$$\chi = \frac{\omega_0 \omega_M}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\omega \omega_M}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (6)$$

$$\omega_M = \gamma M_s, \quad \omega_0 = \gamma H_{eff}$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота спиновой волны, M_s – намагниченность насыщения ферромагнетика, γ – гиромагнитная постоянная, H_{eff} – эффективное магнитное поле ферромагнетика.

Достаточно полное представление эффективного магнитного поля приведено в теории спинволновых мод [14], и представляет собой сумму внутреннего постоянного магнитного поля H_0 , с учетом размагничивающего поля формы, и поля неоднородного обменного взаимодействия. Размагничивающие поля формы зависят от направления намагничивания структуры [17]:

- в случае нормального намагничивания (H_{oe} направлен по нормали к плоскости структуры):

$$H_{eff} = H_0 - M_s + \alpha \nabla^2 m(r, t); \quad (7)$$

• в случае касательного намагничивания (Ное лежит в плоскости структуры):

$$H_{eff} = [H_0(H_0 + M_s)]^{1/2} + \alpha \nabla^2 m(r, t). \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8): α – константа неоднородного обменного взаимодействия, $m(r, t)$ – переменная намагниченность. Внутренне постоянное магнитное поле являет собой сумму внешнего (приложенного) постоянного магнитного поля H_{e0} и полей анизотропии, которое учитывает магнитную кристаллографическую и магнитоупругую типы анизотропии. И, как было описано выше, через обратный магнитоэлектрический эффект, вследствие явления магнитострикции, прикладываемое электрическое поле меняет эффективное полемагнитоупругого взаимодействия. Пользуясь методом эффективных размагничивающих факторов:

$$H_0 = H_{e0} + M_s \sum_i (N_{x,y}^i - N_z^i), \quad (9)$$

где $N_{x,y,z}$ – эффективные размагничивающие факторы. Так как, в дальнейшем в качестве феррита будет использоваться железоиттриевый гранат (ЖИГ) и в качестве сегнетоэлектрика – пьезокерамика цирконат-титанат свинца (ЦТС), то дальнейшие рассуждения будут основываться на физике структуры ЖИГ-ЦТС. Вследствие того, что ферритам с решеткой типа граната свойственная кубическая кристаллографическая анизотропия, то с учетом разумного приближения данный тип анизотропии классически описывается выражением $2K_1/M_s$ [18].

В случае магнитоупругого взаимодействия вызванного МЭ эффектом математическое описание имеет чуть сложнее форму. В предположении общей теории: макроскопической однородной модели, которая рассматривает композит с точки зрения МЭ-эффекта как гомогенный материал [17], влияние электрического поля на слоистый мультиферроидный композит описывается через $N_{\sigma\rho q}$ – эффективные размагничивающие факторы анизотропии магнитоупругого взаимодействия. Для системы координат многослойного композита (рисунок 1), для случая, когда электрическое поле направлено по оси симметрии, выражения будут иметь вид [19]:

$$N_{11}^\sigma - N_{33}^\sigma = 2[(B_{31} - B_{33})E + (b_{31} - b_{33})E^2] \cos^2 \theta, \quad (10)$$

$$N_{22}^\sigma - N_{33}^\sigma = 2[(B_{31} - B_{33})E + (b_{31} - b_{33})E^2] \cos 2\theta, \quad (11)$$

$$N_{12}^\sigma = 0, \quad (12)$$

где $1', 2', 3'$ – система координат, в которой ось $3'$ направлена вдоль равновесной намагниченности, θ – угол между равновесной намагниченностью и осью симметрии кристалла, B_{ij} и b_{ij} – линейные и нелинейные магнитоэлектрические коэффициенты, E – приложенное к структуре электрическое поле.

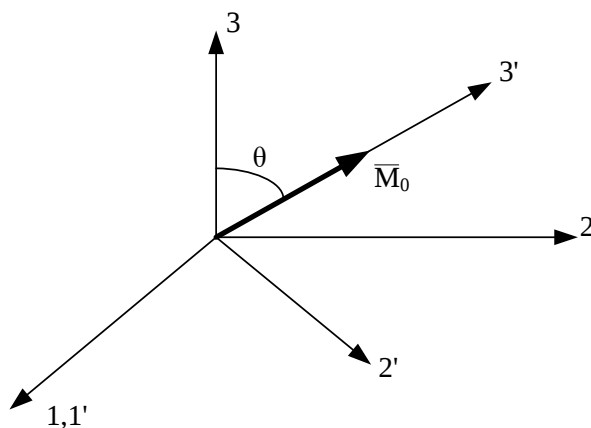


Рисунок 1. Система координат многослойного композита

И, при учете только линейных МЭ констант, а также факта со направленности электрического поля с осью симметрии кристалла, можно воспользоваться рассчитанными значениями для наиболее часто встречающихся композитов, а именно, для связки ЦТС – ЖИГ:

$$2M_0(B_{31} - B_{33}) = 0,125 [\text{Э} * \text{см/кВ}], \quad (13)$$

здесь E имеет размерность кВ/см.

Таким образом, выражение для внутреннего постоянного поля феррита принимает следующий вид:

$$H_0 = H_{e0} + \frac{2K_1}{M_s} + 0,125E \quad (14)$$

Дисперсионные характеристики спиновых волн

На основе выражений (3) – (5), с учетом (7), (8), (14), в безобменном приближении ($\alpha \nabla^2 \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) = 0$) и нулевом приложенном электрическом поле, были получены дисперсионные характеристики спиновых волн для трех вышеуказанных случаев (рисунок 2). На рисунках 2а и 2б, верхняя граница определяется из следующего выражения:

$$\omega_{\perp} = [\omega_0(\omega_0 + \omega_M)]^{1/2}. \quad (15)$$

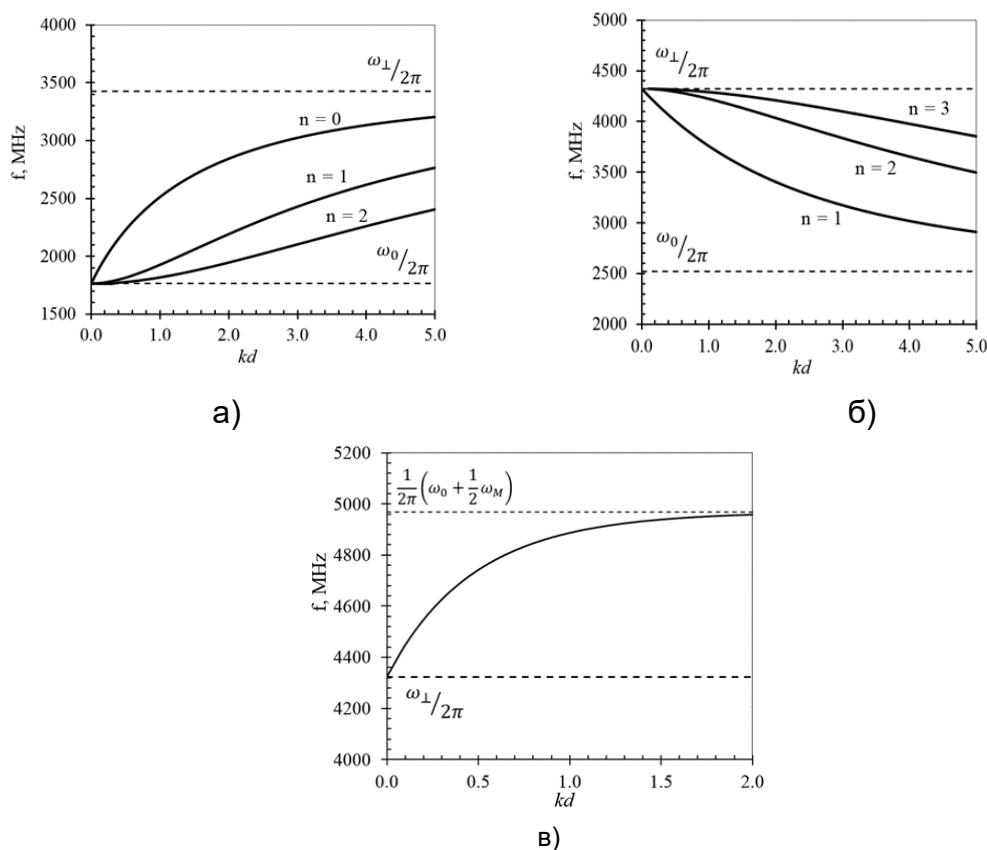


Рисунок 2. Дисперсионные характеристики спиновых волн: а) прямых объемных; б) обратных объемных; в) поверхностной

Как видно из рисунка 2, объемные спиновые волны характеризуются многомодовостью. Однако, основными переносчиками энергии являются низшие моды, из-за большего значения групповой скорости.

Сосредоточим внимание на вкладе обменного взаимодействия. Здесь имеет место разумное приближение:

$$\alpha \nabla^2 m(r, t) \equiv M_s \alpha \left[k^2 + \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Для большинства ферромагнетиков константа неоднородного обменного взаимодействия α имеет порядок 10^{-12} см², для ЖИГ $\alpha = 3.1 \cdot 10^{-12}$ см² [14]. Это подтверждается тем фактом, что основное влияние обменное взаимодействие на спектр спиновых волн оказывает в области больших волновых чисел [17]. Однако, при уменьшении толщины ферритовой пленки, обменное взаимодействие также начинает оказывать влияние, только на старшие спин-волновые моды. Такое влияние приводит к сдвигу по частоте спин-волновых мод (кроме основной). И в определенный момент происходит их пересечение с основной (низшей) модой. В этих областях происходит расщепление спектра, т.е. волны будут выталкиваться из этих областей. Этот процесс достаточно подробно описан в теории спин-волновых мод [14].

При определённой толщине возникает ситуация, при которой старшие моды отдаляются вверх по частоте настолько, что уже не пересекают основную моду. Данный факт, а также как было отмечено выше об основной (низшей) моде, как основном переносчике энергии, дает все основания использовать при дальнейших расчетах только основную моду и пренебрежении других спин-волновых мод.

Следующим важным вопросом, который требует анализа, является учет обменных граничных условий. Данный тип граничных условий, помимо классических (электродинамических), на основе которых были построены дисперсионные выражения (4) – (6), учитывает состояние закрепления спинов на поверхностях ферритовой пленки. В работе [14] показана зависимость существования поверхностных волн от параметров закрепления. Полную картину закрепления поверхностных спинов описывают граничные условия Радо-Уиртмана [19], в 2016 году была проведена их «ревизия» в терминах плотности свободной энергии [20]:

$$K_{surf}(\vartheta, \varphi) = d[F^{surf} - F^{bulk}], \quad (17)$$

где $K_{surf}(\vartheta, \varphi)$ – плотность энергии поверхностной анизотропии, ϑ, φ – пространственные углы, d – постоянная решетки, F^{surf} и F^{bulk} – поверхностная и объемная плотности свободной энергии, соответственно. Здесь принято рассматривать два предельных частных случая: случай с полностью закрепленными спинами, для которого характерно $K_{surf}(\vartheta, \varphi) \gg 0$, т.е. $F^{surf} \gg F^{bulk}$ – поверхностная плотности свободной энергии значительно преобладает над объемной. Второй предельный частный случай, который по-другому называют естественное состояние, характеризуется полностью свободными спинами – $K_{surf}(\vartheta, \varphi) = 0$. В этом случае $F^{surf} = F^{bulk}$ поверхностная и объемная плотности свободной энергии равны. Следует сказать, что закрепление поверхностных спинов носит, в большей степени, искусственный характер, путем введения поверхностных неоднородностей, или же под действием полей особой формы. Здесь можно сделать вывод о том, что выражения (3) – (5) соответствуют ситуации с полностью свободными поверхностными спинами.

В свете вышесказанного объективно заключение, что приведенная выше математическая модель способна описывать поведение спиновых волн, которые распространяются в мультиферроидной структуре, при воздействии неоднородных электрических полей. Под неоднородным электрическим полем понимается поле, имеющее градиентное распределение в плоскости структуры. Для случая размещения магнитоэлектрической структуры в плоскости (001):

$$\mathbf{E}(x, y) = \nabla E = E \left(\hat{x} \frac{d}{dx} + \hat{y} \frac{d}{dy} \right), \quad (18)$$

где $\hat{x}$ и $\hat{y}$ – единичные векторы.

На рисунке 3 представлено поведение спиновых волн при приложении к структуре электрического поля 10 кВ/см и – 10кВ/см.

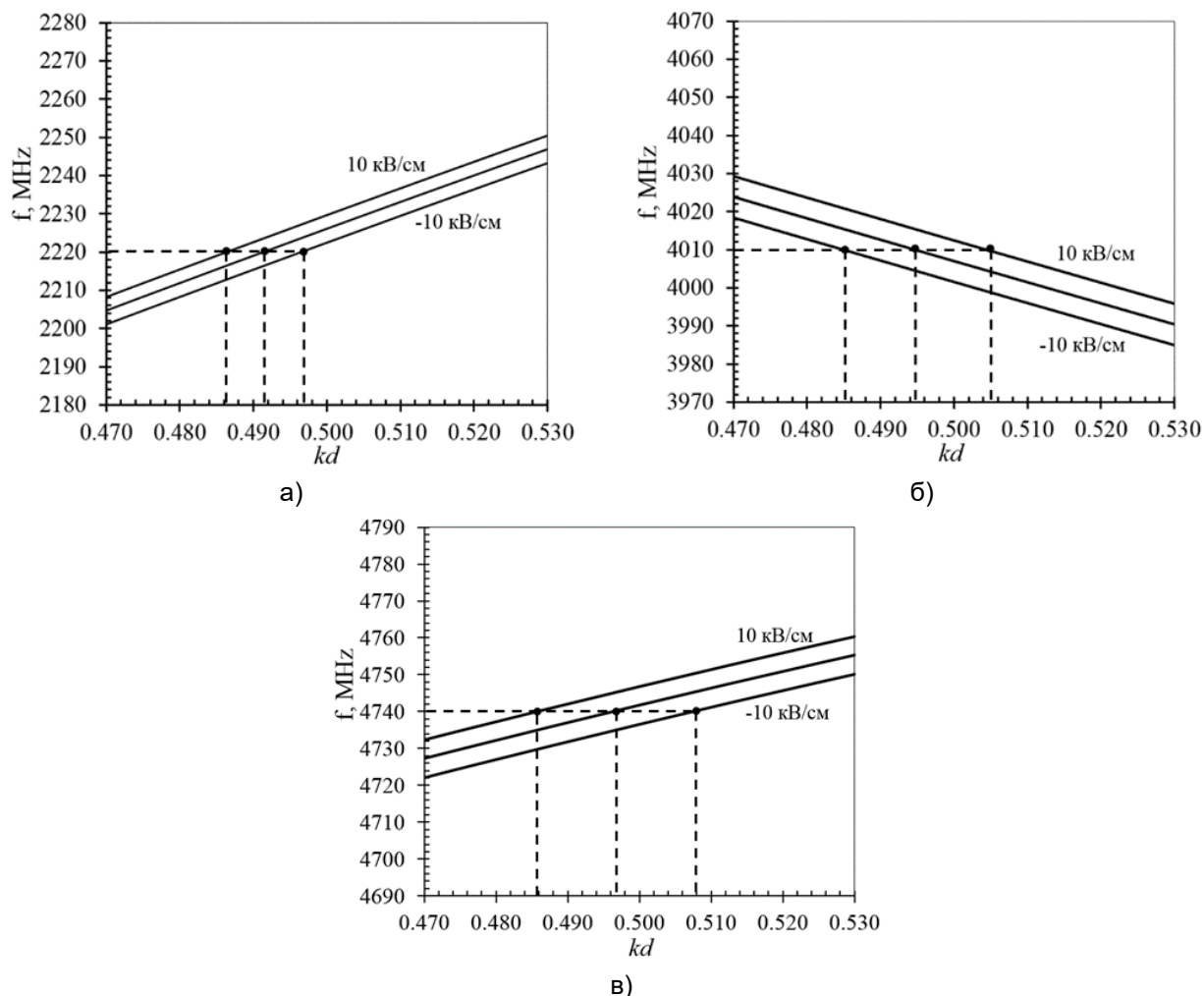


Рисунок 3. Дисперсионные характеристики спиновых волн при приложении к МЭ структуре электрического поля ± 10 кВ/см: а) прямая объемная спиновая волна; б) обратная объемная спиновая волн; в) поверхностная спиновая волна

Как видно из рисунка 3, приложение электрического поля к МЭ структуре приводит к небольшому сдвигу по частоте спектра спиновой волны. Но, как было указано выше, из-за малой групповой скорости этот небольшой сдвиг приводит к фазовому сдвигу. Оценим этот сдвиг. На оси абсцисс указаны относительные значения, произведение постоянной распространения и ширины ферромагнитного слоя kd , следовательно, для расчета фазового набегу возьмем отношение длины структуры к толщине ферритового слоя:

$$kd \cdot \frac{L}{d} = kL = \varphi. \quad (19)$$

Предположим, что отношение L/d равно 10^3 , что может соответствовать вполне реальной задаче, в которой рассматривает МЭ структура длиной 1 мм с толщиной ферритовой пластины 1 мкм. В таком случае приложение

электрического поля величиной ± 10 кВ/см даст фазовый сдвиг: для прямой спиновой объемной волны (рисунок 3а) $\sim \pm 315$ град.; для обратной спиновой объемной волны (рисунок 3б) $\sim \mp 573$ град.; для поверхностной спиновой волны (рисунок 3в) $\sim \pm 630$ град. На основе «беглого анализа» можно заключить, что наибольший фазовый сдвиг характерен для поверхностной волны, а сдвиг для обратной объемной спиновой волны имеет обратный знак. Последнее является следствием свойств обратных спиновых волн, а именно фазовая и групповая скорости имеют противоположные направления.

Таким образом, построенная математическая модель способна решать задачи, связанные с распространением спиновых волн в МЭ структуре, качественно и количественно оценивать вклад внешнего электрического поля. А относительная ее простота, по сравнению с моделями, представленными в работах [14, 15], позволяет аналитически оценивать поведение результирующих дисперсионных характеристик на внешние воздействия (имеется в виду изменения внешних полей: электрического и магнитного).

Применение математической модели

Как было отмечено выше построенная математическая модели позволяет решать широкий круг задач. И, первая задача – управление направлением распространения спин-волнового колебания. Данная задача исследовалась в работе [13]. Рассматривалась структура (рисунок 4), в которой центральная часть представляла собой МЭ композит.

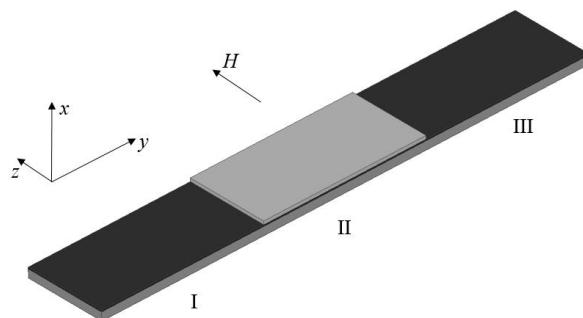


Рисунок 4. Исследуемая МЭ структура

Приложение к МЭ структуре градиентного электрического поля вызвал поворот спин-волнового колебания в 30 град (рисунки 5 и 6). Величина данного поворота описывался следующим выражением:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{k(0) - k(40)}{k(0)} * \frac{L}{d} \right), \quad (20)$$

где L , d – длина и ширина МЭ структуры; $k(0)$ и $k(40)$ – значения постоянной распространения при значениях приложенного электрического поля 0 кВ/см и 40 кВ/см.

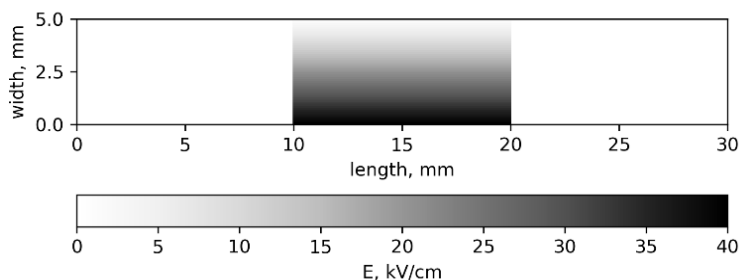


Рисунок 5. Градиентное распределение приложенного электрического поля по ширине МЭ структуры

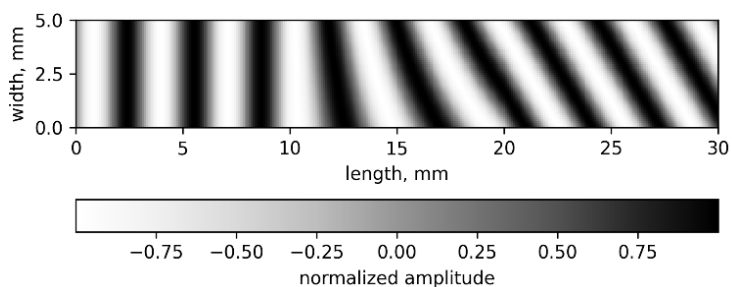


Рисунок 6. Распределение нормализованной амплитуды спиновой волны по плоскости структуры

Еще одной задачей, которая решалась с использованием построенной модели, проектирование электронно-перестраиваемого МЭ логического элемента, который в зависимости от величины прикладываемого электрического поля менял свое функциональное назначение с **XOR** на **OR**. Исследовалась структура, на основе магнитоэлектрического волнового конвольвера, в котором в активную область помещалась МЭ структура (рисунок 7).

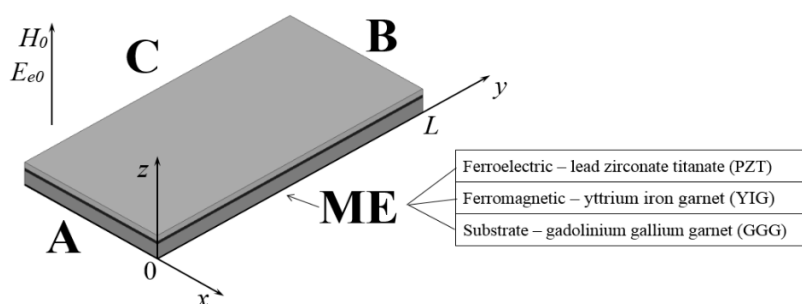


Рисунок 7. Исследуемая модель МЭ базового логического элемента

В следствии заданной ориентации магнитных полей, в структуре создавались условия существования прямой объемной спиновой волны. Далее производился расчет на основе выражения (1) со следующими параметрами: толщина ферритового слоя $d = 20$ мкм, длина $L = 10$ мм. На основе численного эксперимента было установлено, что для частоты спиновой волны $f = 2399,6$ МГц при нулевом внешнем электрическом поле фазовое расстояние между входами **A** и **B** $kL = n2\pi$, где $n = 62$, $k = 389.5$ см⁻¹. В этом случае сигналы между входами **A** и **B** находились в фазе, что соответствует логической функции **OR**. Приложение внешнего

электрического поля величиной 9,3 кВ/см, приводил к фазовому сдвигу на величину π . В этом случае сигналы между входами **A** и **B** переходили в состояние противофазы, что соответствует логической функции **XOR** (рисунок 8).

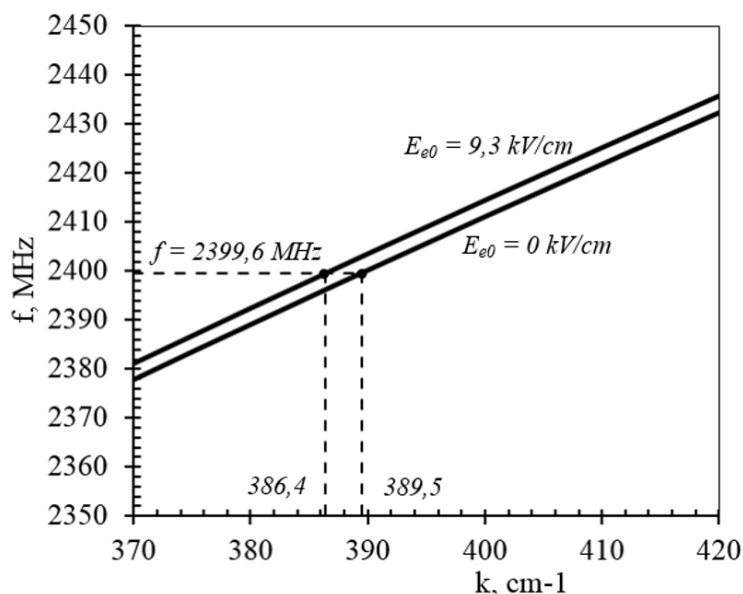


Рисунок 8. Дисперсионная характеристика прямой объемной спиновой волны при двух значениях внешнего электрического поля

Заключение

Таким образом, построена математическая модель поведения слоистой мультиферроидной структуры в неоднородных электрических полях. Данная модель может использоваться для широкого круга задач, связанных с исследованием поведения МЭ структуры, в свете прохождения через них спиновых волн, проектирование электронно-управляемых устройств направленного распространения спинволновых колебаний. Также, данная модель может использоваться в новой и актуальной на сегодняшний день области построения моделей нейроморфных вычислений на основе спиновых волн.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-19-20045, <https://rscf.ru/project/24-19-20045/>).

Список литературы

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. Magnetoelectric composites. New York: Ltd, 2019. 296 p.
2. Vopson M. V. Fundamental of multiferroic materials and their possible application // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2015. 40(4). 223-250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584

3. Petrov R. V., Tatarenko A. S., Srinivasan G., Mantese J. V. Antenna miniaturization with ferrite-ferroelectric composites // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2008. 50(12). 3154-3157. DOI: 10.1002/mop.23939
4. Бичурин М. И., Петров Р. В., Воробьев Ю. Д., Килиба Ю. В. Полосовой перестраиваемый магнитоэлектрический СВЧ фильтр // *Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования*, 8-12 декабря 1997, Москва: в 2 вып. Вып. 2. Проблемы геоэкологии, разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Применение аэрокосмических технологий в науках о Земле. Электронные, оптико-электронные и микроволновые приборы и системы. Новые информационно-интеллектуальные системы и технологии. Проблемы и достижения высшего и среднего образования. Москва, 1997. С. 234-238.
5. Tatarenko A. S., Srinivasan G., Filippov D. A. Magnetolectric microwave attenuator // *Electronics Letters*. 2007. (43)12. 674-675. DOI: 10.1049/el:20070949
6. Bichurin M. I., Petrov R.V. Magnetolectric Phasers for PAS // *Proceedings of The 2nd International Conference on Satellite Communications*. Moscow, 1996. P. 172-176. DOI: 10.1109/ICSC.1996.864274
7. Бичурин М. И., Петров Р. В., Соловьёв И. Н., Соловьёв А. Н., Коваленко Д. В. Исследование магнитоэлектрического СВЧ-гириатора // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. 2. 201-208.
8. Petrov R. V., Nikitin A. O., Bichurin M. I., Srinivasan G. Magnetolectric antenna array // *International Journal on Communications Antenna and Propagation*. 2020. 10(6). 371-376. DOI: 10.15866/irecap.v10i6.18658
9. *Multiferroic Materials: Properties, Techniques, and Applications* / edited by Junling Wang. CRC Press, 2017. 392 p.
10. Liu M., Sun N. X. Voltage control of magnetism in multiferroic heterostructures // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009. 372. 20120439. DOI: 10.1098/rsta.2012.0439
11. Chumak A. V., Kabos P., Wu V., Abert C., Ademann C., Adeyeye F. O., Akerman J. et al. Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing // *IEEE Transactions on Magnetism*. 2022. 58(6). 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664
12. Nikitin A. O., Petrov R., Kiselev V., Misilin V., Bozhkov S., Milenov I., Bozhkov P. Magnonic commutator on magnetolectric gradient structure for artificial neural networks // *18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. Varna: Bulgaria, 2023. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA58392.2023.10202336
13. Григорьева Н. Ю., Калиникос Б. А. Теория спиновых волн в пленочных ферромагнитных многослойных структурах: монография. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 179 с.
14. Nikitin A. O., Petrov R. V. Magnetolectric gradient structures // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 2052. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012029
15. Prabhakar A., Stancil D. D. *Spin Waves: Theory and Applications*. New York, NY: Springer, 2009. 355 p.
16. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. Москва: Физматлит, 1994. 464 с.
17. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферримангнетики: перевод с английского. Москва: Мир, 1965. 675 с.
18. Бичурин М. И., Петров Р. В., Филиппов Д. А., Сринивасан Г. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 2005. 226 с.

19. Rado G. T., Weertman J. R. Spin-wave resonance in a ferromagnetic metal // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959. 11(3-4). 315-333. DOI: 10.1016/0022-3697(59)90233-1

20. Puzkarski H. Rado–Weertman boundary equation revisited in terms of the free-energy density of a thin film // *Acta Physica Polonica Series A*. 2016. 129(6). RK.129.6.1-3. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.RK.129.6.1-1

References

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric composites*. New York: Ltd, 2019. 296 p.

2. Vopson M. V. Fundamental of multiferroic materials and their possible application // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015. 40(4). 223-250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584

3. Petrov R. V., Tatarenko A. S., Srinivasan G., Mantese J. V. Antenna miniaturization with ferrite-ferroelectric composites // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2008. 50(12). 3154-3157. DOI: 10.1002/mop.23939

4. Bichurin M. I., Petrov R. V., Vorobyov Yu. D., Kiliba Yu. V. Polosovoy perestraivayemyy magnitoelektricheskiy SVCH fil'tr [Bandpass tunable magnetoelectric microwave filter] // *Proceedings of the International Forum on Science, Technology and Education*, December 8-12, 1997, Moscow: in issue 2, Issue. 2. Problems of geocology, exploration and exploitation of mineral deposits. Applications of aerospace technologies in geosciences. Electronic, optical-electronic and microwave devices and systems. New information and intelligent systems and technologies. Problems and achievements of higher and secondary education. Moscow, 1997. P. 234-238.

5. Tatarenko A. S., Srinivasan G., Filippov D. A. Magnetoelectric microwave attenuator // *Electronics Letters*. 2007. 43(12). 674-675. DOI: 10.1049/el:20070949

6. Bichurin M. I., Petrov R. V. Magnetoelectric Phasers for PAS // *Proceedings of the 2nd International Conference on Satellite Communications*. Moscow, 1996. P. 172-176. DOI: 10.1109/ICSC.1996.864274.

7. Bichurin M. I., Petrov R. V., Soloviev I. N., Soloviev A. N., Kovalenko D. V. Issledovaniye magnitoelektricheskogo SVCH-giratora [The study of magnetoelectric microwave gyrator] // *Modern problems of science and education*. 2012. 2. 201-208.

8. Petrov R. V., Nikitin A. O., Bichurin M. I., Srinivasan G. Magnetoelectric antenna array // *International Journal on Communications Antenna and Propagation*. 2020. 10(6). 371-376. DOI 10.15866/irecap.v10i6.18658

9. *Multiferroic Materials: Properties, Techniques, and Applications* / edited by Junling Wang. CRC Press, 2017. 392 p.

10. Liu M., Sun N. X. Voltage control of magnetism in multiferroic heterostructures // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009. 372. 20120439. DOI: 10.1098/rsta.2012.0439

11. Chumak A. V., Kabos P., Wu V., Abert C., Ademmann C., Adeyeye F. O., Akerman J. et al. Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing // *IEEE Transactions on Magnetism*. 2022. 58(6). 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664

12. Nikitin A. O., Petrov R., Kiselev V., Misilin V., Bozhkov S., Milenov I., Bozhkov P. Magnonic commutator on magnetoelectric gradient structure for artificial neural networks // *18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. Varna: Bulgaria, 2023. P. 1-4. DOI: 10.1109/ELMA58392.2023.10202336

13. Grigorieva N. Yu., Kalinikos B. A. *Teoriya spinovykh voln v plenochnykh ferromagnitnykh mnogoslownykh strukturakh: monografiya*. Saint-Petersburg: Publishing house of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2008. 179 p.

14. Nikitin A. O., Petrov R. V. Magnetoelectric gradient structures // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2052. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/2052/1/012029
15. Prabhakar A., Stancil D. D. Spin Waves: Theory and Applications. New York, NY: Springer, 2009. 355 p.
16. Gurevich A. G., Melkov G. A. Magnitnyye kolebaniya i volny [Magnetic oscillations and waves]. Moscow: Fizmatlit, 1994. 464 p.
17. Lax B., Button K. Sverkhvysokochatotnyye ferrity i ferrimagnetiki: perevod s angliyskogo [Ultra-high-frequency ferrites and ferrimagnets: translated from English]. Moscow: Mir, 1965. 675 p.
18. Bichurin M. I., Petrov V. M., Filippov D. A., Srinivasan G. Magnitoelektricheskiy effekt v kompozitsionnykh materialakh [Magnetoelectric effect in magnetostriction-piezoelectric multiferroics]. Veliky Novgorod: Yaroslav-the-Wise NovSU, 2005. 226 p.
19. Rado G. T., Weertman J. R. Spin-wave resonance in a ferromagnetic metal // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1959. 11(3-4). 315-333. DOI: 10.1016/0022-3697(59)90233-1
20. Puzskarski H. Rado–Weertman boundary equation revisited in terms of the free-energy density of a thin film // Acta Physica Polonica Series A. 2016. 129(6). P. RK.129.6.1-3. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.RK.129.6.1-1

Информация об авторе

Никитин Александр Олегович – старший научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-0726-4047, allnikotin@gmail.com

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК НОВГУ»

Рукопись статьи должна быть тщательно вычитана автором (-ами) перед предоставлением в редакцию журнала.

К рассмотрению принимается только полный комплект документов:

- 1) статья, оформленная строго в соответствии с требованиями;
- 2) лицензионный договор от каждого соавтора статьи;
- 3) экспертное заключение о возможности опубликования (экспортный контроль);
- 4) заключение о возможности открытого опубликования (государственная тайна).

Автор подписывает *Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения* на русском языке (для зарубежных авторов – его *английскую версию*). Если у статьи несколько соавторов, лицензионный договор составляется *на каждого из них в отдельности*. При возникновении затруднений воспользуйтесь "Памяткой по заполнению лицензионного договора", высылаемой редакцией по запросу.

В экспертных заключениях *обязательно* должны быть: подпись эксперта (-ов), руководителя экспертной группы или руководителя организации; дата; гербовая печать / печать организации. Отсканированная копия экспертного заключения, лицензионный договор и электронный вариант статьи отправляются в редакцию журнала на электронную почту vestnik@novsu.ru

Комплект документов считается принятым к рассмотрению *после официального подтверждения*, поступившего ответным письмом с почты журнала. Если у статьи несколько соавторов, необходимо указать, кто является корреспондирующим автором.

Все полученные статьи после рассмотрения по формальным признакам подвергаются обязательному рецензированию. Качество публикуемых статей контролируется редколлегией, в состав которой входят ведущие ученые российских и зарубежных вузов и академических институтов.

Плата с авторов за публикацию не взимается, гонорары не выплачиваются, поступившие в редакцию материалы не возвращаются.

Напоминаем нашим авторам, что научный журнал «Вестник НовГУ» включен в Перечень ВАК с 2010 г., с 2022 г. в ранжированном списке ему присвоена категория K2. Все вопросы, связанные с публикацией, сроками, оформлением сопроводительных документов следует направлять на электронную почту редакции vestnik@novsu.ru

С уважением, редакция журнала



Журнал «Вестник Новгородского государственного университета» входит в перечень ведущих научных журналов и изданий России, рекомендуемых ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней. Индексируется в базах данных РИНЦ, EBSCO и Ulrich's Periodicals Directory.