

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

12·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Декабрь, 2025

№ 12 (817)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-84127 от 28 ноября 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций

12+

Журнал входит в перечень рецензируемых научных журналов,
включенных в список ВАК, для публикации основных результатов
кандидатских и докторских диссертаций

Учредитель:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия
Козырев А.В., проф. (зам. гл. редактора), Томск,
Россия
Пермякова Л.В. (отв. секретарь), Томск, Россия
Алексеев С.В., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Асеев А.Л., акад. РАН, Новосибирск, Россия
Борисов А.В., проф., Москва, Россия
Вараксин А.Ю., акад. РАН, Москва, Россия
Ворожцов А.Б., проф., Томск, Россия
Войцеховский А.В., проф., Томск, Россия
Гитман Д.М., проф., São Paulo, Бразилия
Демин В.А., проф., Пермь, Россия
Джафаров Р.Г., д.ф.-м.н., Баку, Азербайджан
Дитенберг И.А., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Ивонин И.В., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Кистенев Ю.В., проф., Томск, Россия
Ковалевская Т.А., проф., Томск, Россия
Колобов Ю.Р., проф., Белгород, Россия
Коротаев А.Д., проф., Томск, Россия
Майер Г.В., проф., Томск, Россия
Манка Оронцо, проф., Неаполь, Италия
Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия
Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков
Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция
Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия
Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада
Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия
Суржиков А.П., проф., Томск, Россия
Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Тао Вен-Куан, академик Китайской академии
наук, Сиань, Китай
Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь
Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия
Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия
Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия
Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor,
Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Academician RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, Italia
Mesyats G.A., Academician RAS, Moscow, Russia
Neklyudov I.M., Academician UAS, Kharkov, Ukraine
Oztop Hakan, Professor, Elazığ, Turkey
Ratakhin N.A., Academician RAS, Tomsk, Russia
Saghir Ziad, Professor, Toronto, Canada
Saranin A.A., Corr. Member RAS, Vladivostok, Russia
Surzhikov A.P., Professor, Tomsk, Russia
Sukhanov D.Y., Professor, Tomsk, Russia
Tao Wen-Quan, Academician of the Chinese Academy
of Sciences, Xi'an, China
Uglov V.V., Professor, Minsk, Republic of Belarus
Ushakov V.Ya., Professor, Tomsk, Russia
Tchaikovskaya O.N., Professor, Tomsk, Russia
Cherepanov V.N., Professor, Tomsk, Russia
Chumlyakov Y.I., Professor, Tomsk, Russia
Shapovalov A.V., Professor, Tomsk, Russia
Shipilov S.E., Professor, Tomsk, Russia

Журнал «Известия вузов. Физика» выходит 12 раз в год и распространяется по подписке. Подписной индекс 70380 в объединенном каталоге «Пресса России». Полные тексты статей доступны на сайте Научной электронной библиотеки: <https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>. Публикация статей в журнале – бесплатная.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Чернечкин И.А., Милинский А.Ю., Барышников С.В. Тепловые и диэлектрические свойства композитов на основе нитрата рубидия и углеродных нанотрубок..... | 7 |
| Чмерева Т.М., Кучеренко М.Г., Мушин Ф.Ю. Спазер на основе слоистой цилиндрической нанопроволоки..... | 15 |
| Бадьин А.В., Кулешов Г.Е., Журавлев В.А., Дорожкин К.В., Томилов И.М., Кателина Д.С., Москаленко В.Д. Композиты на основе термопластичного полиуретана и технического углерода для электромагнитной совместимости в микроволновом и терагерцовом диапазонах..... | 25 |
| Гриняев К.В., Дитенберг И.А. Влияние комбинированного деформационного воздействия на микроструктуру и микротвердость алюминия..... | 34 |
| Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Куксгаузен И.В., Куксгаузен Д.А., Петраков В.А. Влияние частиц γ' - и β -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК–ОЦТ–маргенситного превращения в [001]-кристаллах высокоэнтропийного сплава FeNiCoAlTa..... | 41 |
| Бакина О.В., Федотов Н.Ю., Лернер М.И. Особенности деагломерации электровзрывных двухкомпонентных янус-наночастиц Cu–Fe..... | 51 |

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лозовой К.А. Энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом..... | 58 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Помогаев В.А., Буглак А.А., Кубенко В.Г., Кононов А.И. Фотодинамика переноса протона в молекуле 5,6,7,8-тетрагидробиоптерина..... | 65 |
| Князькова А.И., Снегерева М.С., Вражнов Д.А., Распопин Г.К., Кистенев Ю.В. Угловая зависимость спектров комбинационного рассеяния в кристалле ZnGeP ₂ : анализ симметрии и определение компонентов рамановских тензоров..... | 72 |
| Лопес Гуардадо Д.А., Николаев В.В., Зеар А., Кистенев Ю.В. Анализ спектров поглощения газовых проб при помощи фазорного подхода..... | 80 |
| Третьяков А.К., Махманазаров Р.М., Вражнов Д.А., Кистенев Ю.В., Шипилов С.Э. Мультиспектральный синтез квазиизображений ТГц-, ИК- и СВЧ-сенсорике с использованием метода гистограмм ориентированных градиентов..... | 86 |
| Бурнин М.А., Богданов О.В. Моделирование ОУМ-волн от кольцевой антенной решетки..... | 95 |

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Бернгардт А.Е., Ерофеев Д.В., Борщ В.Н., Бойков А.В. Интеграция L2 концентратора в оборудование эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA..... | 104 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Николаев А.Г., Бугаев А.С., Гридилов В.Д., Гушенец В.И., Окс Е.М., Прокопенко Н.А., Юшков Г.Ю. Эрозия катодов вакуумной дуги при микросекундном диапазоне длительности импульсов..... | 110 |
| Белоцветов Д.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Панарин В.А., Сорокин Д.А. Наблюдение структуры свечения положительных стримеров в углекислом газе..... | 117 |
| Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Толкачев О.С., Крысина О.В., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Покрyтия диоксида титана, полученные вакуумно-дуговым методом в режимах с плазменным ассистированием: синтез, структура, свойства..... | 125 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Жуков И.А., Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., Ермолаев Е.В., Ахметгалиев Р.Ш., Егошин В.А., Шугаев Ш.Н. Численное моделирование отвода летучих компонентов при обжиге металлокерамических корпусов для интегральных микросхем..... | 133 |
| Шнейдер А.А., Шеремет М.А. Математическое моделирование вынужденной конвекции в осесимметричном канале при локальном нагреве стенки..... | 143 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Архипов В.А., Басалаев С.А., Бондарчук И.С., Золоторёв Н.Н., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г. Экспериментальное исследование плотности орошения при сбросе жидкого хладагента с борта БПЛА..... | 151 |
| Зиятдинов М.Х., Жуков А.С., Куликов А.Е., Байгонакова Г.А. Синтез горением композиционных ферросплавов в режиме термического сопряжения..... | 158 |

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Станкевич С.В., Эмурлаев К.И., Котов Д.И., Буров В.Г., Батаев И.А., Батаева З.Б. Механизм изнашивания стали Гадфильда при нагружении по схеме качения индентора с проскальзыванием..... | 167 |
| Пухова Е.А., Дробяз Е.А., Батаев В.А. Стойкость к окислению поверхностных слоев на стали 12Х18Н9Т, легированных бором и цирконием..... | 172 |

ПЕРСОНАЛИЯ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Майер Г.В., Некрылов С.А., Степнов А.О. Академик Владимир Евсеевич Зуев и развитие российских классических университетов в советский и постсоветский период..... | 176 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

УКАЗАТЕЛИ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика» за 2025 г. | 184 |
| Именной указатель журнала «Известия вузов. Физика» за 2025 г. | 193 |

CONTENTS

CONDENSED-STATE PHYSICS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Chernechkin I.A., Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V. Thermal and dielectric properties of composites based on rubidium nitrate and carbon nanotubes | 7 |
| Chmereva T.M., Kucherenko M.G., Mushin F.Yu. A spaser based on a layered cylindrical nanowire | 15 |
| Badin A.V., Kuleshov G.E., Zhuravlev V.A., Dorozhkin K.V., Tomilov I.M., Katelina D.S., Moskalenko V.D. Thermoplastic polyurethane/carbon black composites for microwave and terahertz electromagnetic compatibility | 25 |
| Grinyaev K.V., Ditenberg I.A. Influence of combined deformation on the microstructure and microhardness of aluminum | 34 |
| Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V., Kuksgauzen I.V., Kuksgauzen D.A., Petrakov V.A. Effect of γ' - and β -phase particles on the development under stress of FCC–BCT martensitic transformation in the [001]-oriented FeNiCoAlTa high-entropy alloy crystals | 41 |
| Bakina O.V., Fedotov N.Y., Lerner M.I. The features of deagglomeration of electroexplosive Janus-like Cu–Fe bicomponent nanoparticles | 51 |

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Lozovoy K.A. Energetics of the formation of pyramidal epitaxial islands with different contact angles | 58 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

OPTICS AND SPECTROSCOPY

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Pomogaev V.A., Buglak A.A., Kubenko V.G., Kononov A.I. Photodynamics of proton transfer in 5,6,7,8-tetrahydrobiopterin molecules | 65 |
| Knyazkova A.I., Snegerev M.S., Vrazhnov D.A., Raspopin G.K., Kistenev Yu.V. Angular dependence of Raman spectra in ZnGeP ₂ crystal: symmetry analysis and determination of Raman tensors components | 72 |
| Lopez Guardado D.A., Nikolaev V.V., Zayar A., Kistenev Yu.V. Analysis of absorption spectra of gas samples using the phasor approach | 80 |
| Tretyakov A.K., Makhmanazarov R.M., Vrazhnov D.A., Kistenev Yu.V., Shipilov S.E. Multispectral fusion of quasi-images of THz, IR, and microwave sensors using the method of histograms of oriented gradients | 86 |
| Burnin M.A., Bogdanov O.V. Simulation of OAM waves from an annular antenna array | 95 |

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Berngardt A.E., Erofeev D.V., Borshch V.N., Boikov A.V. Integration of the L2 concentrator into the SPD experiment at the NICA accelerator complex | 104 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

PLASMA PHYSICS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Nikolaev A.G., Bugaev A.S., Gridilev V.D., Gushenets V.I., Oks E.M., Prokopenko N.A., Yushkov G.Yu. Erosion of vacuum arc cathodes in the microsecond range of pulse duration | 110 |
| Beloplotov D.V., Skakun V.S., Sosnin E.A., Panarin V.A., Sorokin D.A. Observation of the glow structure of positive streamers in carbon dioxide | 117 |
| Prokopenko N.A., Petrikova E.A., Tolkachev O.S., Krysina O.V., Koval N.N., Ivanov Yu.F. Titanium dioxide coatings obtained by vacuum-arc method in plasma assisted modes: synthesis, structure, properties | 125 |

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Zhukov I.A., Krainov A.Yu., Moiseeva K.M., Ermolaev E.V., Akhmetgaliev R.Sh., Egoshin V.A., Shugaepov Sh.N. Numerical modelling of volatile components removal during firing of ceramic-metal packages for integrated circuits | 133 |
| Shneider A.A., Sheremet M.A. Mathematical simulation of forced convection in an axis-symmetric channel at local heating of the wall | 143 |
| Arkipov V.A., Basalaev S.A., Bondarchuk I.S., Zolotarev N.N., Matvienko O.V., Perfil'eva K.G. Experimental study of irrigation density at liquid coolant discharging from a UAV | 151 |
| Ziatdinov M.H., Zhukov A.S., Kulikov A.E., Baigonakova G.A. Combustion synthesis of composite ferroalloys in thermal conjugation mode | 158 |

BRIEF COMMUNICATIONS

- Stankevich S.V., Emurlaev K.I., Kotov D.I., Burov V.G., Bataev I.A., Bataeva Z.B.** The mechanism of wear of Hadfield steel during loading according to the rolling pattern of the indenter with slippage..... 167
- Pukhova E.A., Drobyaz E.A., Bataev V.A.** Assessment of the oxidation resistance of boron-containing zirconium-doped layers 172

PERSONALITY

- Mayer G.V., Nekrylov S.A., Stepnov A.O.** Academician V.E. Zuev and the development of Russian Universities during the Soviet and post-Soviet period 176

POINTERS

- Index of articles and brief communications published in the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2025 184
- Name index of the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2025 193

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.226

DOI: 10.17223/00213411/68/12/1

Тепловые и диэлектрические свойства композитов на основе нитрата рубидия и углеродных нанотрубокИ.А. Чернечкин^{1,2}, А.Ю. Милинский¹, С.В. Барышников¹¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Приводятся результаты исследования тепловых свойств нанокompозитов, полученных внедрением нитрата рубидия (RbNO_3) в углеродные нанотрубки (УНТ). Дополнительно исследовались тепловые и диэлектрические свойства смесового композита $(\text{RbNO}_3)_{0.99}/(\text{УНТ})_{0.01}$. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о существовании в нанокompозитном образце объемного и наноразмерного нитрата рубидия. Свойства композитов сравниваются с аналогичными свойствами RbNO_3 . Обнаружено уменьшение температуры фазового перехода нитрата рубидия в составе композитов.

Ключевые слова: нитрат рубидия, углеродные нанотрубки, нанокompозит, композит, диэлектрическая проницаемость, дифференциальный термический анализ, тангенс угла потерь.

Введение

Одним из наиболее значимых направлений материаловедения, имеющих важное практическое значение, является физика неоднородных систем [1–3]. Интерес к этим системам обусловлен тем, что они демонстрируют широкий спектр аномальных физических свойств, существенно отличающихся от характеристик однородных материалов. Эти свойства обусловлены сложным взаимодействием фаз, различающихся по химическому составу, кристаллической структуре и физико-химическим характеристикам, а также наличием межфазных границ, влияющих на транспортные, диэлектрические и механические характеристики материала.

Одним из наиболее изучаемых классов неоднородных систем являются композитные материалы, включающие сегнетоэлектрические композиты, в которых сочетаются компоненты с различными структурными и функциональными свойствами [4–6]. Такие материалы могут состоять из сегнетоэлектрической матрицы и включений другой природы (например, металлических, полимерных или углеродных наноструктур), что приводит к изменению их диэлектрической проницаемости, коэрцитивного поля, температуры фазовых переходов и пьезоэлектрических характеристик. Композитные материалы находят широкое применение в микроэлектронике, сенсорике, энергосберегающих технологиях и других областях, где требуется управление диэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами материалов [7, 8].

Использование углеродных нанотрубок (УНТ) в качестве матриц для создания нанокompозитов и устройств на их основе становится одним из интересных направлений в исследованиях и разработке материалов [9–11]. Наполненные УНТ представляют собой наноструктуры: в каналах УНТ содержатся простые вещества или химические соединения. Нанокompозиты на основе УНТ сочетают в себе уникальные свойства матрицы и внедренных веществ, широкий выбор которых позволяет корректировать свойства УНТ в соответствии с целевым применением. Так, в [12] методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии обнаружено, что УНТ, заполненные теллуридом ртути, становятся переносчиками электронов и катализаторами химических реакций, а в [13] для УНТ, наполненных серой, экспериментально обнаружено донорно-акцепторное взаимодействие между частицами серы и УНТ. Внедрение веществ в углеродные нанотрубки позволяет получать одномерные проволоки, физические свойства которых существенно отличаются от свойств объемных материалов [14, 15].

Исследованию нанокompозитов на основе УНТ и классических сегнетоэлектриков посвящен ряд работ [16–21]. Например, в [19–21] исследовались свойства нанокompозитов на основе многостенных нанотрубок, заполненных нитратами цезия (CsNO_3) и калия (KNO_3), методами дифферен-

Спазер на основе слоистой цилиндрической нанопроволоки*

Т.М. Чмерева¹, М.Г. Кучеренко¹, Ф.Ю. Мушин¹

¹ *Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия*

Теоретически исследован спазер с двухуровневой активной средой, который генерирует одномерные осесимметричные поверхностные плазмоны в цилиндрической нанопроволоке с диэлектрическим сердечником и плазмонной оболочкой. В рамках квантовой и «toy model» рассчитаны зависимости частот спазирования и порогового значения инверсии населенностей от волнового числа плазмона. Обе модели приводят к схожим результатам и демонстрируют, что наименьший порог генерации имеет место при совпадении частоты спазирования с частотой перехода в квантовом излучателе, причем в квантовой модели эти частоты совпадают и с частотой плазмона. Динамика спазера проанализирована в резонансных условиях и показано, что с ростом толщины плазмонной оболочки нанопроволоки время выхода в стационарный режим увеличивается, при этом инверсия населенностей увеличивается, а число генерируемых плазмонов уменьшается.

Ключевые слова: слоистая нанопроволока, одномерный плазмон, квантовый излучатель, спазер, двухуровневая система.

Введение

Развитие плазмоники открыло широкие перспективы разработки новых и усовершенствования уже созданных оптоэлектронных устройств. Большинство практических приложений плазмоники основано на взаимодействии квантовых излучателей, расположенных вблизи металлических поверхностей, с электромагнитным полем поверхностных или локализованных плазмонов. Например, в основе принципов работы различных сенсоров и датчиков лежит изменение интенсивности люминесценции квантовых излучателей в присутствии проводящих тел [1–3]. В последние годы объектом повышенного внимания исследователей стали одномерные плазмонные наноструктуры, так как их достаточно просто комбинировать с другими структурными элементами оптоэлектронных устройств без нарушения симметрии и искажения исходных оптических свойств этих устройств [4]. Плазмонные волноводы являются перспективными для передачи сигналов в плотно интегрированных оптических схемах. Однако омические потери в металле велики, поэтому поверхностные плазмоны имеют малую длину распространения, что ограничивает возможности получения волноводов с необходимыми характеристиками. Одним из способов компенсации омических потерь является внедрение квантовых излучателей в сердечник волновода, что превращает его в усиливающую среду [5]. О создании на основе бездефектной серебряной нанопроволоки оптической антенны, работающей во всем видимом диапазоне, которая будет востребована в наноптической спектроскопии, при построении изображений с высоким разрешением и в нелинейном преобразовании сигналов, сообщается в [6]. Также дистанционное возбуждение молекул можно производить посредством поверхностных плазмонов нанопроволоки, что позволит, например, осуществлять управление поверхностными каталитическими реакциями [7].

Характерной чертой современных технологий является миниатюризация функциональных устройств: сенсоров, источников света, фотоэлементов и т.п. К настоящему времени проведена большая исследовательская работа, направленная на создание сверхмалых лазеров. Одним из путей уменьшения размеров лазеров является использование плазмонных резонаторов вместо фотонных [8]. Плазмонными резонаторами могут служить проводящие объекты различной конфигурации: наночастицы, нанопроволоки, пленки нанометровой толщины, канавки на плоской поверхности металла, слои графена и др. [9–11]. Впервые об экспериментальной реализации плазмонного нанолазера сообщалось в работах [12, 13]. Как подчеркивается в [8], плазмонный нанолазер может работать в режиме «темных» мод, т.е. не излучать фотоны, а быть источником сильного ближнего электромагнитного поля, которое возникает, когда безызлучательная передача энергии электронного возбуждения от квантового излучателя усиливающей среды к плазмонному резонатору сопровождается рождением поверхностных плазмонов. Изначально для плазмонного нанолазера, резонатор которого является наноразмерным в трех измерениях, был предложен термин «спазер»

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № 075-15-2024-550.

УДК 537.226.1

DOI: 10.17223/00213411/68/12/3

Композиты на основе термопластичного полиуретана и технического углерода для электромагнитной совместимости в микроволновом и терагерцовом диапазонах*

А.В. Бадьин¹, Г.Е. Кулешов¹, В.А. Журавлев¹, К.В. Дорожкин¹,
И.М. Томилов¹, Д.С. Кателина¹, В.Д. Москаленко¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приведены результаты исследования электрофизических свойств композиционного материала, содержащего технический углерод в полимерной матрице из термопластичного полиуретана. Представлены результаты оптической микроскопии. Измерения электромагнитного отклика от материала проводились в коаксиальной волноводной ячейке в диапазоне частот от 0.1 до 18 ГГц и в квазиоптическом спектрометре в диапазоне частот 115–258 ГГц. Показано, что добавление в термопластичный полиуретан одинаковых долей технического углерода приводит к почти линейному росту комплексной диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: электрофизические свойства, полимерные композиты, аддитивная технология, коэффициент прохождения, технический углерод.

Введение

В последнее время наблюдается заметный рост числа исследований в области электромагнитной совместимости и экранирования, что обусловлено растущими требованиями к защите радиоэлектронных устройств, аэрокосмической техники и микроэлектроники от естественных и наведенных помех [1, 2]. Современные аддитивные технологии открывают новые возможности для создания функциональных материалов, предназначенных для эффективного поглощения и отражения электромагнитных волн. 3D-печать, основанная на методе послойного наплавления материала (FDM), позволяет с высокой скоростью и низкой себестоимостью изготавливать многослойные конструкции и изделия сложной геометрии, что делает ее перспективной для разработки эффективных экранирующих структур при использовании композиционных филаментов [3, 4]. Среди них особо выделяют проводящие пластики для 3D-печати на основе углеродных структур, металлических включений или полимеров с собственной электропроводимостью [5, 6]. Ключевым фактором, определяющим свойства таких композитов, является состав и концентрация наполнителей.

Традиционно для создания экранирующих материалов использовались композиты с наполнителями на основе порошков металлов с высокой проводимостью (медь, алюминий, никель). Однако их применение в аддитивной технологии методом послойного наплавления ограничивается рядом факторов. Прежде всего, для получения электропроводящего филамента требуется тесный контакт между частицами и, следовательно, большие концентрации наполнителя в полимере, что приводит к значительному снижению механо-прочностных свойств, увеличению веса материала и технологическим сложностям при изготовлении тонкостенных конструкций [7, 8]. В связи с этим возрастает интерес к углеродным наполнителям, таким как технический углерод (ТУ), углеродные нанотрубки и графен, которые сочетают легкость, гибкость и высокую эффективность экранирования [9].

Среди углеродных материалов ТУ представляет особый интерес благодаря своей доступности, низкой стоимости, хорошей электропроводности и совместимости с полимерными матрицами, что делает его перспективным для использования в аддитивных технологиях [10–12]. Кроме того, углеродные материалы обладают выдающейся термостойкостью и способностью эффективно рассеивать электромагнитную энергию, что позволяет создавать на их основе легкие и эффективные поглотители.

Таким образом, разработка новых полимерных композиционных материалов для снижения уровня электромагнитного излучения и использования в технологии 3D-печати является актуальной задачей [13, 14].

* Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-20174, <https://rscf.ru/project/25-29-20174/> и средств Администрации Томской области.

Влияние комбинированного деформационного воздействия на микроструктуру и микротвердость алюминия*

К.В. Гриняев¹, И.А. Дитенберг¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования влияния комбинированного деформационного воздействия, включающего механическую активацию и последующую консолидацию кручением под давлением, на микроструктуру и микротвердость алюминия. В сечении, перпендикулярном плоскости наковален, наблюдается формирование анизотропного состояния в виде субмикроструктурной полосовой структуры, фрагментированной на субзерна. Выявлено два типа высокодефектного состояния: субмикроструктурные зерна с кривизной кристаллической решетки до нескольких десятков град/мкм и нанокристаллические зерна с двойниками наноразмерной толщины. Таким образом, после комбинированного деформационного воздействия структурное состояние алюминия является сложным структурным композитом. Установлено, что существенное повышение значений микротвердости в центральной и периферийной части образца-диска после консолидации обеспечивается формированием высокодефектного состояния в прекурсор порошка алюминия на стадии механической активации.

Ключевые слова: алюминий, механическая активация, кручение под давлением, микроструктура, микротвердость.

Введение

Метод кручения под высоким квазигидростатическим давлением (КПД) широко известен как один из эффективных способов интенсивного деформационного воздействия для формирования в металлических материалах субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) состояний [1–12]. Другим не менее важным достоинством данного метода является возможность его применения для консолидации различных порошков металлов и их смесей, в том числе после механической активации [1, 5–12]. Среди актуальных вопросов при использовании комплексного деформационного воздействия, включающего механическую активацию с последующей консолидацией кручением под давлением, по-прежнему остается выявление особенностей трансформации структурно-фазового состояния и комплекса физико-механических свойств в металлических системах разного класса. Кроме того, немаловажным является изучение влияния условий деформационного воздействия на процессы структурной трансформации, что представляет интерес при разработке новых технологий получения и обработки металлических материалов.

В настоящей работе проведено исследование влияния предварительной механической активации на микроструктуру и микротвердость алюминия, консолидированного методом кручения под давлением.

Материалы и методика исследования

В работе использован порошок алюминия (99.99%, марки ПА-ВЧ) и смесь из этого порошка с 0.05 вес.% С. Механическая активация (МА) в планетарной шаровой мельнице Retsch PM400 проводилась в среде аргона при 400 об/мин. В качестве мелющих тел использованы стальные шары в соотношении 10:1. Время обработки составляло 5 ч.

Консолидация порошка и прекурсоров проведена методом кручения (5 оборотов) под давлением (4 ГПа) при комнатной температуре. Получены образцы в форме дисков толщиной $h \approx 0.2$ мм и диаметром 8 мм.

Исследование микроструктуры методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проведено с использованием Philips CM 30 TWIN при ускоряющем напряжении 300 кВ. Методика приготовления тонких фольг в сечении, перпендикулярном плоскости наковален, и методика темнопольного анализа разориентировок подробно представлены в работах [13, 14] соответственно.

Микротвердость (HV) определялась методом Виккерса на приборе «Neophot 21» при нагрузке 0.5 Н с выдержкой не менее 15 с. Измерения проведены в сечении, перпендикулярном плоскости наковален. Для определения среднего значения выполнено не менее 10 измерений.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

Влияние частиц γ' - и β -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК–ОЦТ-мартенситного превращения в [001]-кристаллах высокоэнтропийного сплава FeNiCoAlTa*

Ю.И. Чумляков¹, И.В. Киреева¹, И.В. Куксгаузен¹, Д.А. Куксгаузен¹, В.А. Петраков¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования по влиянию частиц γ' - и β -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК–ОЦТ-мартенситного превращения (МП) и температурный интервал сверхэластичности (СЭ) в высокопрочных высокоэнтропийных неэквивалентных кристаллах Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%), ориентированных для растяжения вдоль [001]-направления в ГЦК-фазе. Показано, что одноступенчатое старение при 973 К, 10 ч и двухступенчатое старение при 973 К, 5 ч и затем при 873 К, 3 ч приводит к созданию нанокompозитной структуры, состоящей из ГЦК-фазы и частиц двух фаз: γ' -фазы (атомно-упорядоченной по типу $L1_2$) и β -фазы (атомно-упорядоченной по типу $B2$). После термических обработок СЭ наблюдается в интервале температур от температуры начала прямого превращения при охлаждении M_s до 298 К после старения при 973 К, 10 ч и до 393 К после двухступенчатого старения. В кристаллах, состаренных при 973 К, 0.5 ч, происходит выделение только частиц γ' -фазы и СЭ наблюдается в интервале температур от 77 до 323 К. Проведен термодинамический анализ, который показал, что появление СЭ при $T \geq M_s$ связано с влиянием частиц β -фазы на уровень упругой энергии при МП ΔG_{el} .

Ключевые слова: монокристаллы, мартенситное превращение, наноразмерные частицы γ' - и β -фазы, сверхэластичность.

Введение

В последнее время значительный научный и практический интерес связан с разработкой новых высокоэнтропийных неэквивалентных сплавов FeMnNiAlCr, FeMnCrNiSi, FeNiCoAlX (X = Ta, Ti, Nb) с эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ), которые могут конкурировать со сплавами на основе TiNi [1–14]. Эти сплавы на основе железа имеют ряд преимуществ по сравнению со сплавами на основе TiNi [1]. Во-первых, они обладают высокой пластичностью в закаленном состоянии из-за отсутствия дальнего порядка, который уменьшает пластичность, и могут деформироваться до 96% при комнатной температуре [3–6]. В $B2$ -интерметаллидах на основе TiNi пластичность не превышает 20–30% и сильно зависит от концентрации Ti и Ni [1–4]. Во-вторых, сплавы на основе железа состоят из недорогих компонентов и, следовательно, могут использоваться как большеразмерные элементы весом до нескольких тонн, например, как демпфирующие системы в небоскребах и других приложениях [3, 8, 9].

В высокоэнтропийных сплавах FeNiCoAlX (X = Ta, Ti, Nb, V) высокотемпературная ГЦК-фаза (аустенит) испытывает термоупругое мартенситное превращение (МП) в ОЦТ-мартенсит и с ГЦК–ОЦТ МП связаны аномально большие значения СЭ от 5 до 13.5% и ЭПФ от 5 до 8.7% в поли- и монокристаллах [3–14]. В поли- и монокристаллах неэквивалентных высокоэнтропийных сплавов FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti, V) при старении обнаружены два типа наноразмерных частиц: когерентные частицы γ' -фазы с упорядоченной по типу $L1_2$ -структурой в теле зерна поликристаллов и в монокристаллах и некогерентные частицы β -фазы с упорядоченной по типу $B2$ -структурой по границам зерен в поликристаллах и в монокристаллах [2–14]. Химический состав γ' -фазы близок к $(\text{FeNiCo})_3\text{AlX}$ (X = Ta, Nb, Ti), а β -фазы близок к $(\text{FeNiCo})\text{AlX}$ (X = Ta, Nb, Ti) [3].

В поликристаллах FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) выделение частиц β -фазы по границам зерен приводит к хрупкому разрушению вдоль границ зерен с начала развития МП под нагрузкой, что делает невозможным исследование ЭПФ и СЭ [3, 8, 9]. Легирование бором от 0.03 до 0.07 ат.% одновременно с созданием высокой плотности малоугловых границ в теле зерна затрудняет выделение частиц β -фазы вдоль границ зерен. Выделение когерентных частиц γ' -фазы диаметром $d = 3\text{--}5$ нм в сочетании с острой текстурой $\langle 100 \rangle \{035\}$ в поликристаллах и выбором ориентации [001] в монокристаллах создает условия для наблюдения аномально большой СЭ до 9–13.5% с большим механическим гистерезисом $\Delta\sigma = 400$ МПа и ЭПФ от 4 до 8% [3, 8–10]. Увеличение раз-

* Результаты были получены за счет гранта Российского научного фонда № 25–19–00024, <https://rscf.ru/project/25–19–00024/>.

Особенности деагломерации электровзрывных двухкомпонентных янус-наночастиц Cu–Fe*

О.В. Бакина¹, Н.Ю. Федотов¹, М.И. Лернер¹

¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Впервые рассмотрены особенности ультразвуковой деагломерации янус-наночастиц Cu–Fe. Наночастицы были получены при совместном электрическом взрыве медной и железной проволок в атмосфере аргона. Средний размер частиц составлял 63 нм, фазовый состав представлен только фазами α -Fe и Cu, поверхность частиц обогащена ионами Cu^{2+} и Fe^{3+} . Дзета-потенциал наночастиц (НЧ) Cu–Fe представлял собой среднеарифметическое значение дзета-потенциалов отдельных НЧ Cu и НЧ Fe, взятых в эквимольных количествах. Установлено, что ультразвуковая деагломерация частиц Cu–Fe сопровождалась коагуляцией после 20 с воздействия, а время диспергирования, обеспечивающее наименьший средний размер агломератов, являлось средним между временами диспергирования НЧ меди и железа.

Ключевые слова: деагломерация, двухкомпонентные наночастицы, ультразвуковое диспергирование, электрический взрыв проволок.

Введение

Двухкомпонентные наночастицы (дНЧ) – это частицы, которые состоят из комбинации двух различных металлов или их соединений, разделенных между собой на уровне одной частицы четко выделенной границей раздела фаз [1]. Ранее сообщалось, что дНЧ более эффективны, чем монометаллические [2]. В большом количестве работ представлено разнообразие комбинаций соединений, способных образовывать дНЧ. Тем не менее некоторые распространенные комбинации включают использование переходных металлов, таких как медь и железо [3–5]. Эти два металла можно комбинировать как между собой, так и с другими металлами для получения различных свойств, включая расширение их биомедицинского применения.

В настоящее время среди методов получения дНЧ сложного состава особое внимание уделяется физическим методам. Это связано с их достаточной производительностью, биологической безопасностью и отсутствием органических примесей и других загрязнений. Электрический взрыв проводников (ЭВП) позволяет получать нанопорошки со средним размером 40–90 нм практически любых металлов, сплавов, оксидов, нитридов, карбидов металлов с производительностью не менее 200 г/ч [6]. Преимуществами ЭВП-технологии перед другими физическими методами является возможность варьирования параметров синтеза, использования одновременно нескольких проволок при взрыве и относительно узкая функция распределения НЧ по размерам [7]. Относительно недавно авторами работы [8] было предложено применение ЭВП двух свитых проволок для получения дНЧ со структурой янус-НЧ. Преимущественное формирование НЧ с такой структурой определяется соотношением температур плавления и плотностей металлов, также величиной перегрева проволок и особенностями взаимного растворения компонентов в бинарных системах согласно равновесным диаграммам состояния [9]. В соответствии с правилами Юм – Розери расслоение преобладает у пар металлов с различным типом кристаллических решеток [10]. Кроме того, если температура плавления одного из металлов выше, то в приповерхностные области частиц будет вытесняться металл с меньшей температурой плавления. Рост величины перегрева металлов при ЭВП приводит к разделению металлических компонентов и образованию янус-НЧ.

При получении НЧ ЭВП они вступают в контакт друг с другом, образуя агломераты и агрегаты. Если речь идет о монометаллических НЧ с приблизительно одинаковым размером, то в зависимости от температуры могут формироваться агрегаты, связанные силами Ван-дер-Ваальса (более низкая температура), и агломераты, которые связаны перешейками металла (более высокая температура) [11]. Как правило, чем меньше температура плавления металла, тем сильнее агломерированы НЧ. Образование перешеек, происходящее между НЧ за счет низкотемпературного плавления в точке контакта, связано с размерным фактором и термодинамическим фактором, обу-

* Работа выполнена в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Новые материалы специального назначения», соглашение о предоставлении субсидии от 25 июня 2025 г. № 075-15-2025-589.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/68/12/7

Энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом*К.А. Лозовой¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На основе развития существующих термодинамических моделей эпитаксиального роста рассмотрена энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом. Предложен метод оценки величины поверхностной энергии граней при известном контактном угле. Показано существование равновесного значения угла при основании, при котором для заданных энергетических, упругих и морфологических параметров системы достигается минимум свободной энергии, что соответствует экспериментально наблюдаемой геометрической форме островка.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, квантовая точка, термодинамика роста, контактный угол.

Введение

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми ямами, нитями и точками находят широкое применение при разработке различных оптоэлектронных устройств, таких как фотоприемники видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, солнечные элементы, полупроводниковые светодиоды и лазеры [1–4]. Перспективным методом формирования квантовых точек является их самопроизвольное образование в процессе молекулярно-лучевой или газофазной эпитаксии. Этот механизм самоорганизации возможен при наличии несовпадения постоянных решеток между подложкой и осаждаемым материалом. Когда толщина двумерного слоя достигает критического значения, накопленные упругие напряжения делают послойный рост неустойчивым и начинается формирование трехмерных островков. Это позволяет снизить упругую энергию системы, что делает процесс термодинамически выгодным. Образующиеся при этом островки являются когерентными с окружающей полупроводниковой матрицей, т.е. не содержат дислокаций несоответствия [5].

В настоящее время признано [6–10], что основным фактором, вызывающим переход от двумерного к трехмерному росту в гетероэпитаксиальных системах, является стремление минимизировать упругую энергию за счет образования трехмерных островков. Для того чтобы в определенном диапазоне толщин осаждаемого слоя происходило формирование когерентных трехмерных островков, необходимо, чтобы рассогласование параметров решеток ε_0 между материалом и подложкой было достаточно большим. Обычно условие $\varepsilon_0 > 2\%$ считается достаточным [11].

К числу таких систем относятся, например, InAs/GaAs с $\varepsilon_0 = 7.2\%$ и Ge/Si с $\varepsilon_0 = 4.2\%$. Причем с увеличением рассогласования образование трехмерных островков начинается на меньших толщинах осаждаемого слоя. Так, в системе InAs/GaAs(001) переход к трехмерному росту происходит при критической толщине h_c около 1.7–1.8 монослоя (МС), а для Ge/Si(001) эта величина составляет порядка 5 монослоев. При большом рассогласовании решеток критическая толщина стремится к нулю и реализуется иной механизм роста: образование трехмерных островков на поверхности подложки без образования смачивающего слоя [12]. В системах с малым расхождением параметров решеток трехмерный рост, как правило, не наблюдается [11].

Во многих системах трехмерные островки имеют форму пирамид с квадратным или прямоугольным основанием, с достаточно стабильным значением отношения высоты островка к размеру основания. Это отношение, определяемое контактным углом при основании, является характерной величиной для каждой материальной системы. Переход к другим формам островков может наблюдаться только при достаточно больших количествах осаждаемого материала.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 538.958

DOI: 10.17223/00213411/68/12/8

Фотодинамика переноса протона в молекуле 5,6,7,8-тетрагидробиоптерина*В.А. Помогаев^{1,2}, А.А. Буглак², В.Г. Кубенко², А.И. Кононов²¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

Спектрально-люминесцентные и фотохимические свойства 5,6,7,8-тетрагидробиоптерина (ТГБП) исследованы с использованием методов гибридной квантово-классической молекулярной динамики различных электронных состояний. Проанализирована лактам-лактимная таутомерия с переносом протона между атомами азота и кислорода пиримидинового кольца ТГБП. На основе траекторий квантово-классической молекулярной динамики были получены интегральные фотостатические оптические спектры ТГБП. Для моделирования фотодиссипации хромофоров применялись методы неадиабатической молекулярной динамики и расчеты электронных возбуждений с использованием смешанных исходных состояний с противонаправленным спином. Вероятностный характер этих процессов обеспечивался стохастической функцией метода наименьшего числа переключений при прыжках между поверхностями. Поиск конических пересечений потенциальных энергетических поверхностей состояний электронно-возбужденного ТГБП проведен для оптимизированной молекулы в основном и переходном состояниях. Получены фотостатические оптические спектры и траектории фотодинамической диссоциации.

Ключевые слова: фотохимия, квантово-классическая динамика, неадиабатика, фотодинамика птерина, тетрагидробиоптерин.

Введение

Стремительное развитие радиационной терапии и медицинских диагностических технологий, базирующихся на использовании фотоиндуцированных процессов, в частности, генерируемых и экспериментально регистрируемых сверхбыстрых (до фемтосекунд) фотопреобразований, потребовало разработки соответствующих теоретических моделей. Фотодинамические интерпретации и предсказания эволюции молекулярной структуры в возбужденных электронных состояниях базируются на компьютерной реализации неадиабатической квантовой механики и гибридных квантово-классических расчетных методов моделирования фотохимических преобразований.

Птерины являются биологическими коферментами и широко представлены среди живых организмов. В последние годы фотохимия птеринов привлекает значительный интерес исследователей в силу своего большого значения для фоторецепции у цианобактерий [1], работы ДНК-фотолиаза и криптохромов [2] высших растений и животных, а также для процесса меланогенеза у человека [3]. В целом физико-химические исследования птеринов последних лет суммированы нами в недавнем обзоре [4].

Молекула 5,6,7,8-тетрагидробиоптерина (ТГБП) играет ключевую роль в обмене ароматических аминокислот и оксида азота NO [5]. В ряде каталитических реакций ТГБП подвергается окислению, депротонированию, дальнейшему окислению и последующему депротонированию, что приводит к образованию хиноидного дигидробиоптерина, который затем подвергается таутомеризации с образованием дигидробиоптерина [6]. Данные процессы рассмотрены в недавней статье с применением методов квантовой химии [7].

Лактам-лактимная таутомерия (рис. 1) хорошо известна у птеринов и во многом обуславливает их уникальные физико-химические свойства и биологическую активность [8]. Так, достаточно подробно исследована таутомерия птеринов в основном электронном состоянии, в том числе с привлечением методов квантовой химии [9]. Однако до сих пор не исследована таутомерия и перенос протона у птеринов, в том числе и ТГБП, в возбужденном состоянии. Данная работа призвана восполнить данный пробел в наших знаниях о фотохимии птеридинов.

* Работа выполнена в рамках государственной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» (проект номер НУ 2.0.4.25 МЛ).

Угловая зависимость спектров комбинационного рассеяния в кристалле $ZnGeP_2$: анализ симметрии и определение компонентов рамановских тензоров*

А.И. Князькова¹, М.С. Снегерева², Д.А. Вражнов¹, Г.К. Распопин¹, Ю.В. Кистенев¹

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты экспериментального исследования угловой зависимости интенсивности поляризованных спектров комбинационного рассеяния света кристалла $ZnGeP_2$ для ориентации [001]. На основе экспериментальных данных восстановлены компоненты рамановских тензоров для мод A_1 , B_1 , B_2 . Экспериментально измеренные зависимости в поляризованных спектрах сопоставлены с теоретическими предсказаниями, что позволило однозначно идентифицировать симметрию колебательных мод. Представленные результаты могут в дальнейшем быть использованы для анализа дефектов в кристаллах $ZnGeP_2$.

Ключевые слова: $ZnGeP_2$, комбинационное рассеяние света, рамановские тензоры, поляризация, фононные моды.

Введение

Фосфид цинка-германия ($ZnGeP_2$) – это полупроводник с тетрагональной халькопиритовой структурой, обладающий нелинейными оптическими характеристиками, что делает его важным материалом в разработке устройств преобразования частоты, включая генерацию второй гармоники [1, 2]. При выращивании кристаллов $ZnGeP_2$ возникают дефекты в структуре, снижающие порог лазерного повреждения. Это связано с тем, что дефекты имеют большое количество энергетических состояний, которые легко поглощают энергию лазера [3]. С другой стороны, структурные дефекты в кристаллах приводят к образованию полос поглощения, которые ухудшают эффективность работы кристалла в оптических устройствах [4]. Поэтому разработка быстрых и неразрушающих методов качественной и количественной оценки дефектов является важной задачей.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является информативным методом исследования колебательных состояний молекул. В твердых телах спектроскопия КРС позволяет регистрировать коллективные колебания атомов (фононные моды) внутри кристаллической решетки. Наличие дефектов нарушают периодичность решетки, что приводит к изменению существующих фононов или появлению новых [5].

Кристаллическая структура $ZnGeP_2$ относится к объемно-центрированной тетрагональной сингонии D_{2d} ($I-42d$) с номером пространственной группы 122 [6] (рис. 1, а). В спектроскопии КРС для измерений применяется прямоугольная система координат X , Y и Z . В случае тетрагональных кристаллов принято считать, что оси X , Y и Z соответствуют кристаллографическим осям a , b и c , которые ориентированы вдоль направлений [010], [100] и [001] (рис. 1, б).

Неприводимое представление рамановских активных мод кристалла $ZnGeP_2$ выглядит следующим образом [7]:

$$\Gamma = A_1 + 3B_1 + 3B_2 + 6E.$$

Моды A_1 , B_1 и B_2 являются невырожденными, мода E – дважды вырожденная. На практике из-за ограничений чувствительности измерительного оборудования и наличия дефектов внутри кристалла не все моды могут быть зарегистрированы.

Интенсивность n -й фононной моды КРС кристалла определяется выражением [8]

$$I_n \propto |\mathbf{e}_i R_n \mathbf{e}_s|^2, \quad (1)$$

где \mathbf{e}_i и \mathbf{e}_s – единичные векторы поляризации электрического поля для падающего и рассеянного света соответственно; R_n представляет собой рамановский тензор, соответствующий фононной моде (например, R_{A_1} соответствует A_1). Кристаллы $ZnGeP_2$ ранее исследовались методом КРС [6, 7, 9–12], однако информация об их рамановских тензорах в литературе отсутствует. Одним из воз-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Анализ спектров поглощения газовых проб при помощи фазорного подхода*

Д.А. Лопес Гуардадо¹, В.В. Николаев¹, А. Зеар¹, Ю.В. Кистенев¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Анализ спектров поглощения газовых проб проводится путем его представления в виде суперпозиции спектров поглощения отдельных компонент пробы. Определение концентрации молекулярных компонент сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Такой подход затруднен, когда состав пробы неизвестен, а также при наличии шума в экспериментальных спектрах. В настоящее время активно развиваются методы из области искусственного интеллекта и компьютерного зрения, основанные на представлении спектральных данных в виде 2D-образов. В работе анализируется подход к преобразованию спектров поглощения газовых проб в графический образ на плоскости с использованием фазорного подхода. В качестве тестовых объектов рассмотрены спектры отдельной линии поглощения, имеющей профиль Лоренца, дублета таких линий и комбинации двух молекулярных компонент с различным соотношением между их концентрациями. Результаты анализа показали, что вид графических образов зависит от ширины и центральной частоты линии поглощения. По результатам анализа смеси двух молекулярных компонент установлено, что положение графического образа суммарного спектра зависит от соотношения концентраций компонент.

Ключевые слова: спектры поглощения газов, определение концентрации газов, фазорный подход, преобразование Фурье.

Введение

Экспериментальные методы оптической спектроскопии, в частности абсорбционной спектроскопии [1–6], широко применяются для содержательного анализа газовых проб в рамках задач мониторинга окружающей среды, промышленной безопасности и медицинской диагностики [7, 8]. При оценке концентрации компонент газовой смеси используют различные аппроксимации формы линии поглощения [9], такие как профили Лоренца, Гаусса и Фойгта [10, 11]. Такой подход эффективен, если удается найти спектральную область, в которой линии поглощения исследуемых компонент изолированы от других или, по крайней мере, состав газовой пробы известен [12]. Основная проблема содержательного анализа газовых смесей природного происхождения методами абсорбционной спектроскопии заключается в том, что их состав лишь частично известен (случай так называемых «серых» систем [13]). Для «серых» систем были разработаны методы декомпозиции смесей лишь с относительно небольшим количеством компонент, ориентировочно не более десяти. Применение методов искусственного интеллекта, к примеру искусственных нейросетей (ИНС), в рамках данной задачи ограничено тем, что большая часть архитектур ИНС ориентирована на анализ графических образов, в частности, двумерных (2D) изображений. В связи с этим актуальны методы представления профилей спектров поглощения в виде графических образов.

Одним из вариантов преобразования спектральных кривых в 2D-данные является фазорный подход. Данный подход применяется, в частности, для графического анализа кривых затухания флуоресценции [14, 15]. При возбуждении флуоресценции последовательностью коротких импульсов с частотой повторения ω кривая затухания флуоресценции $I(t)$ может быть представлена точкой на плоскости с координатами g и s , определяемыми фазорным преобразованием:

$$G = g(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} I(t) \cos(\omega t) dt}{\int_0^{\infty} I(t) dt},$$
$$S = s(\omega) = \frac{\int_0^{\infty} I(t) \sin(\omega t) dt}{\int_0^{\infty} I(t) dt}.$$

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2024-557 от 25.04.2024 г.).

УДК 535.8

DOI: 10.17223/00213411/68/12/11

Мультиспектральный синтез квазиизображений ТГц-, ИК- и СВЧ-сенсорики с использованием метода гистограмм ориентированных градиентов

А.К. Третьяков¹, Р.М. Махманазаров¹, Д.А. Вражнов¹, Ю.В. Кистенев¹, С.Э. Шипилов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрен подход к решению задачи мультиспектрального синтеза квазиизображений ТГц-, ИК- и СВЧ-сенсорики (каналов данных) для извлечения информативных признаков из экспериментальных данных, регистрируемых от подповерхностных объектов. Предложен унифицированный конвейер предварительной обработки данных. Реализована гибридная схема приведения разнородных данных к единой шкале единиц измерения путем извлечения градиентных карт из квазиизображений методом гистограмм ориентированных градиентов. Синтез однородных данных осуществлен путем построения 3-мерного многообразия при помощи попарной корреляции рассчитанных градиентных карт.

Ключевые слова: ТГц-спектроскопия, ИК-спектроскопия, СВЧ-спектроскопия, слияние разнородных данных, метод гистограмм ориентированных градиентов, машинное обучение, дистанционное зондирование.

Введение

Задача дистанционного зондирования приповерхностного слоя почвы для поиска искусственных предметов (далее, целевых объектов или ЦО) сопряжена с рядом трудностей. Детектируемые ЦО изготовлены из разных материалов и требуют специфических методов сенсорики. Отдельные физические свойства ЦО могут быть схожи с окружающей его средой. Кроме того, ЦО могут быть заслонены другими объектами, что искажает отклик от ЦО при зондировании. Решением перечисленных проблем может быть использование массива сенсоров, которые нацелены на измерение широкого спектра физических свойств (мультиканальные системы) [1, 2]. Это позволит повысить количество регистрируемых признаков наличия или отсутствия ЦО [3].

Для проведения анализа экспериментальных данных подобных мультиканальных систем в настоящее время выделяют два подхода – объединение разнородных и однородных данных [4, 5]. К однородным относят данные от сенсоров, представленные одной единицей измерения. Примером могут служить размеры объекта, оцененные линейкой и лазерным дальномером. Слияние однородных данных чаще всего осуществляется при помощи схем с весами, определяющих вклад каждого канала данных в результирующее значение.

Для анализа разнородных данных требуется предварительно привести их к единой шкале единиц измерения при помощи определенного алгоритма [6]. В наибольшей степени распространен подход, в котором в качестве обозначенного алгоритма выступает обученная прогностическая модель, которая предсказывает наличие или отсутствие ЦО в терминах вероятности от 0 до 100%. Для каждого канала данных используется своя прогностическая модель на основе методов машинного обучения (МО) с учителем [7]. Разновидности описанного подхода предполагают присвоение больших весов тем прогностическим моделям, метрики качества которых выше. Анализируя набор полученных вероятностей, можно принять результирующее решение о наличии или отсутствии ЦО. К достоинствам данного подхода можно отнести отсутствие необходимости приводить данные к одной шкале единиц измерения и независимость каналов данных. К недостаткам – необходимость подбора весов для каждого канала данных при принятии результирующего решения о присутствии ЦО. В качестве входных данных для прогностических моделей используются векторы признаков (ВП). В рамках настоящего исследования ВП – это двумерные данные (квазиизображения), соответствующие различным сенсорам, где один ВП соответствует одному квазиизображению.

Альтернативным подходом является приведение данных к единой шкале единиц измерения, т.е. переход к нормированным или относительным величинам, к примеру, переход к градиентам температуры, диэлектрической проницаемости, теплопроводности и т.д. [8]. В этом случае рассчитанные между соседними пикселями градиенты исходного квазиизображения образуют карту гра-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2024-557 от 25.04.2024 г.).

Моделирование ОУМ-волн от кольцевой антенной решетки*

М.А. Бурнин¹, О.В. Богданов^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлено моделирование кольцевой антенной решетки из десяти спиральных антенн в среде COMSOL Multiphysics, генерирующей электромагнитные волны с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в миллиметровом диапазоне. Исследованы диаграммы направленности и фазовые распределения излучения для различных топологических зарядов ($l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$). Продемонстрировано формирование стабильного спирального волнового фронта на расстоянии $\sim 1.5\lambda$ от излучателя. Моделирование дифракции на двух щелях и треугольной апертуре выявило характерную зависимость смещения интерференционной картины от знака и величины ОУМ, а также сохранение поляризации. Разработанная модель открывает перспективы для применения в системах пространственного мультиплексирования и фундаментальных исследований взаимодействия закрученного излучения с веществом.

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, круговая поляризация, кольцевая антенная решетка, спиральная антенна, диаграммы направленности, математическое моделирование.

Введение

Методы генерации, детектирование и применение закрученных волн с орбитальным угловым моментом (ОУМ) – активно развивающееся направление в физике. Экспериментальная работа В.Ю. Баженова, М.В. Васнецова и М.С. Соскина [1] одной из первых продемонстрировала возможность преобразования лазерного пучка с плоским волновым фронтом в лазерный пучок с дислокациями различных порядков при прохождении через многомодовый волновод и при дифракции на синтезированных голограммах. В дальнейшем ставшая знаковой работа Аллена и его коллег [2] продемонстрировала, что пучки света с модами Лагерра – Гаусса несут ОУМ, связанный со спиральной структурой волнового фронта. Особый интерес к ОУМ-волнам обусловлен их уникальными свойствами: ортогональность мод с различными топологическими зарядами, позволяющая реализовать мультиплексирование в пространстве углового момента; самовосстановление структуры пучка после прохождения через препятствия; спин-орбитальное взаимодействие, открывающее возможности для управления поляризационными характеристиками и др. Перенос такими волнами ОУМ – дополнительной степени свободы, имеет ряд практических приложений, среди которых решение проблемы спектральной перегрузки и существенного увеличения пропускной способности систем связи. Это стимулировало как развитие теоретических исследований, так и разработки прикладных технологий, включая создание специализированных антенных систем. Например, в недавних исследованиях [3–5] предложен метод мультиплексирования сигналов с помощью вихревых фотонов, создаваемых круговой антенной решеткой, и их демultipлексирования. Этот подход демонстрирует возможность создания независимых каналов передачи информации за счет ортогональности мод с различными проекциями углового момента. В работах [6–11] представлен обзор современных методов мультиплексирования с использованием орбитального углового момента в системах беспроводной связи. Эти исследования демонстрируют значительный потенциал данного подхода для существенного увеличения пропускной способности каналов передачи данных.

Работы [12–15] отражают динамичное развитие этой междисциплинарной области. Исследования охватывают широкий спектр направлений, включая электродинамику, антенную технику, ускорительную физику и теорию информации. Например, недавно проведены эксперименты по исследованию переходного излучения релятивистских электронов на пучках SAGA LS [16]. Специфическая дифракционная картина от когерентного переходного излучения на двойной щели и треугольной апертуре выявила, что такой, ставший классическим, вид излучения переносит ОУМ.

Технологические аспекты практической реализации систем с ОУМ детально рассмотрены в монографиях [17, 18]. Особое внимание уделено проектированию антенных решеток, способных

* Исследования выполнены при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-009 от 28.02.2025 г.).

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 539.1.075

DOI: 10.17223/00213411/68/12/13

Интеграция L2 концентратора в оборудование эксперимента SPD
на ускорительном комплексе NICA*А.Е. Бернгардт¹, Д.В. Ерофеев¹, В.Н. Борщ¹, А.В. Бойков²¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия*

Концентратор второго уровня L2 является составной частью системы сбора данных установки SPD на ускорительном комплексе NICA и реализуется на базе ПЛИС. Основная функция концентратора L2 – сбор данных с нескольких концентраторов первого уровня (L1) по интерфейсам 10G Ethernet с последующей сортировкой и передачей данных на сервер обработки через PCIe интерфейс. Представлены результаты тестирования физического интерфейса 10G Ethernet, а также пропускной способности интерфейса PCIe 3.0. Описан алгоритм API, обеспечивающий прием пакетов переменной длины, и модуль для обработки асинхронных команд на стороне концентратора L1. Полученные результаты подтверждают соответствие текущей версии концентратора L2 требованиям по приему, сортировке и передаче данных в рамках эксперимента SPD.

Ключевые слова: ПЛИС, NICA, SPD, физика высоких энергий, алгоритмы сбора данных, детекторная электроника, L2 концентратор.

Введение

Проект NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) – это современный коллайдер, создаваемый в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна), направленный на исследование фундаментальных свойств сильного взаимодействия. Одним из двух детекторов, создаваемых для работы на NICA, является детектор Spin Physics Detector (SPD), предназначенный для изучения спиновой структуры нуклонов и легких ядер. Детектор регистрирует характеристики частиц, возникающих в столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов, что позволяет получить ценную физическую информацию о спиновой структуре частиц [1].

Для обработки больших потоков данных, формируемых при работе детекторов, в системе применяется специализированная электроника и программное обеспечение для быстрого сбора, сортировки и анализа информации в реальном режиме времени. Составной частью системы сбора данных (Data Acquisition System, DAQ) является концентратор уровня L2, основанный на программируемых логических схемах (ПЛИС), что обеспечивает гибкую настройку и адаптацию обработки данных под требования эксперимента (рис. 1). Высокая пропускная способность системы достигается посредством использования многоканальных оптоволоконных соединений стандарта Ethernet 10GBASE-LR и интерфейса Peripheral Component Interconnect Express 3.0 (PCIe 3.0). Общая архитектура системы сбора и обработки данных концентратора L2 описана в работе [2].

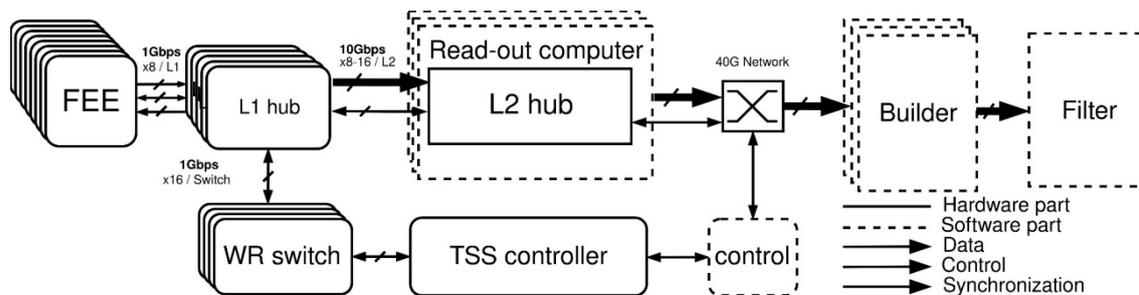


Рис. 1. Схема системы сбора данных эксперимента SPD

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2025-0023).

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 621.384

DOI: 10.17223/00213411/68/12/14

**Эрозия катодов вакуумной дуги
при микросекундном диапазоне длительности импульсов***А.Г. Николаев¹, А.С. Бугаев¹, В.Д. Гридилев¹, В.И. Гушенец¹,
Е.М. Окс¹, Н.А. Прокопенко¹, Г.Ю. Юшков¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Представлены результаты измерения удельной эрозии катодов вакуумной дуги при длительностях импульсов от 1 до 550 мкс. Показано, что эрозия материалов с температурой плавления более 500 °С не зависит от длительности импульса и находится в диапазоне 30–100 мкг/Кл, а эрозия катодов с температурой плавления менее 500 °С соответствует этому диапазону только при длительности импульса менее 10 мкс. При длительности импульса дуги 250–550 мкс эрозия для этих материалов достигает аномально высоких значений, 500–1000 мкг/Кл. Показано, что это связано с возрастанием капельной фракции при плавлении поверхности катода на глубину десятки микрометров в течение импульса дуги.

Ключевые слова: вакуумная дуга, удельная эрозия, катодное пятно, микрокапельная фракция.

Введение

Вакуумная дуга находит широкое практическое применение в различных технологических устройствах, таких, например, как ионно-плазменные напылительные установки или источники пучков ионов металлов для модификации поверхности [1–4]. При горении вакуумной дуги на поверхности катода функционируют катодные пятна [5–8], которые эмитируют плазму и микрокапли материала катода. В результате горения дуги масса катода уменьшается и этот процесс принято характеризовать параметром удельная эрозия катода γ , представляющим собой отношение потерь массы катода к количеству электрического заряда, пропущенного через цепь дуги. Поскольку эрозия материала катода за счет испарения неионизованных атомов много меньше удельной эрозии γ , то для детализации процесса эрозии значение γ принято представлять суммой удельной ионной эрозии γ_i и удельной микрокапельной эрозии γ_d .

Некоторые применения вакуумной дуги требуют ее длительного, многочасового непрерывного функционирования [9], время которого ограничено расходом материала катода. Таким образом, эрозия катода является одним из важных параметров устройств на основе вакуумной дуги, поскольку она определяет время непрерывной работы любого устройства на ее основе. С другой стороны, поскольку все основные процессы эрозии катода сосредоточены в катодных пятнах, то исследование поведения γ , γ_i и γ_d при различных условиях эксперимента представляется важным для изучения физических процессов в катодном пятне вакуумной дуги.

Исследованиям удельной эрозии катода вакуумной дуги посвящено большое количество работ [10–12], однако основное внимание их авторы уделяли исследованию удельной ионной эрозии γ_i , определяющей процесс генерации плазмы. Настоящая работа посвящена исследованию общей удельной эрозии катодов γ при функционировании вакуумной дуги с амплитудой импульса тока 150 А, типичной для вакуумных дуговых ионных источников [13, 14]. В работе были исследованы катоды из 13 материалов, обладающих различными теплофизическими свойствами [15].

Методика и техника эксперимента

Схема разрядной системы, в которой осуществлялись измерения удельной эрозии материала катода вакуумной дуги, приведена на рис. 1. Была использована конструкция электродов вакуумной дуги с инициированием импульсным разрядом по поверхности диэлектрика, подробно рассмотренная в работе [16]. Катодный узел представлял собой катод I диаметром 6.3 мм и длиной

* Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0006.

Наблюдение структуры свечения положительных стримеров в углекислом газе*

Д.В. Белоплов¹, В.С. Скакун¹, Э.А. Соснин^{1,2}, В.А. Панарин¹, Д.А. Сорокин^{1,2}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Обнаружены различные зоны свечения головки стримера, формируемого в условиях апокампического разряда в углекислом газе при давлении от 3 до 12 Торр и распространяющегося со скоростью $\sim 2 \cdot 10^7$ см·с⁻¹. Посредством время-разрешенной оптической диагностики обнаружено, что головка стримера состоит из основной ярко светящей зоны и предшествующей ей слабо светящей зоны, ранее названной нами предвестником. Временной лаг между зонами составляет несколько наносекунд. Предполагается, что свечение предвестника соответствует области некомпенсированного положительного заряда ионов и находится в непосредственной близости к фронту стримера, где напряженность электрического поля достигает максимального значения. Основная ярко светящая зона соответствует телу стримера. Найденные факты следует использовать для внесения дополнений в модель катодонаправленного стримера.

Ключевые слова: воздух, углекислый газ, апокампический разряд, азот, стример, волна ионизации.

Введение

Формирование, моделирование и практическое использование стримерных разрядов в газовых средах – широко распространенные предметы исследований. Стримерный механизм пробоя присущ как природным [1, 2], так и лабораторным электроразрядным явлениям [3–5]. Стример представляет собой волну ионизации, которая формируется в условиях сильного внешнего электрического поля в слабоионизованной среде и распространяется со скоростями 10^5 – 10^9 см·с⁻¹. При этом за счет некомпенсированного электрического заряда в окрестности фронта ионизационной волны возникает сильное электрическое поле, обеспечивающее ионизацию среды перед собой, что позволяет волне продвигаться в область с более низкой напряженностью поля [6, 7].

Спектральное распределение энергии излучения плазмы стримера в воздухе атмосферного давления формируется, преимущественно, переходами второй положительной (2^+) системы молекулярного азота (N_2) и первой отрицательной системы (1^-) молекулярного иона азота (N_2^+) [8]. Как показали эксперименты [9, 10], проведенные для стримеров в воздухе при нормальных условиях, высвечивание указанных полос происходит не одновременно, а с задержкой по отношению друг к другу, что подтверждается теоретическими расчетами в работе [11], показывающими, что задержка высвечивания 2^+ системы N_2 по отношению к 1^- системе N_2^+ не превышает 400 пс.

На сложность происходящих в окрестности фронта ионизации процессов также указывают расчеты, выполненные в работах [12, 13], где показано, что фронт стримера (в двухмерной проекции по ходу его распространения) имеет сложную структуру: нестационарные и неравновесные процессы ускорения свободных электронов, ионизации и возбуждения, а также излучательной релаксации возбужденных состояний, которые реализуются на разных временных интервалах.

Сравнительно недавно [14] был исследован разряд при пониженных давлениях воздуха и была выявлена определенная структура свечения головки стримера: яркому свечению вблизи головки стримера предшествует менее яркий «предвестник», форма которого зависит от условий распространения. Таким образом, переход к низким давлениям позволил зафиксировать сложную структуру свечения стримера с помощью высокоскоростной съемки с наносекундным временным разрешением.

Проведенные исследования ставят вопрос о том, является ли обнаруженная структура свечения головки стримера универсальным его свойством или данное обстоятельство имеет место лишь в средах с определенным газовым составом.

Настоящая работа призвана проверить это предположение, используя в качестве среды, где формируются стримеры, углекислый газ. Научное значение этих исследований состоит в том, что мы углубляем наши знания о газоразрядных явлениях, а полученные данные в будущем можно

* Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

Покрyтия диоксида титана, полученные вакуумно-дуговым методом в режимах с плазменным ассистированием: синтез, структура, свойства*

Н.А. Прокопенко¹, Е.А. Петрикова¹, О.С. Толкачев¹,
О.В. Крысина¹, Н.Н. Коваль¹, Ю.Ф. Иванов¹

¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Сформированы покрытия диоксида титана вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом и детально исследованы их структура, фазовый состав и свойства. Показано, что величина тока разряда источника газовой плазмы является одним из ключевых параметров, позволяющим управлять фазовым составом покрытия диоксида титана, его твердостью и износостойкостью. Диоксид титана в покрытиях присутствует в двух полиморфных модификациях – рутил и анатаз, относительное содержание которых зависит от условий плазменного ассистирования. Покрытия диоксида титана, независимо от режима плазменного ассистирования, являются нанокристаллическим материалом, имеющим столбчатое строение.

Ключевые слова: диоксид титана, вакуумно-дуговой плазменно-ассистированный метод, напыление, фазовый состав, структура, микротвердость, износостойкость.

Введение

Известно, что диоксид титана существует в виде нескольких модификаций. В природе встречаются кристаллы с тетрагональной сингонией (анатаз, anatase; рутил, rutile) и ромбической сингонией (брукит, brookite) [1]. Искусственно получены еще две модификации высокого давления – ромбическая IV и гексагональная V [2]. При нагревании и анатаз, и брукит необратимо превращаются в рутил (температуры перехода, соответственно, 400–1000 °С и около 750 °С) [3]. Показано, что уменьшение размеров зерна способствует стабилизации фазы анатаза при термическом воздействии [4]. Микротвердость рутила $VH_{100} = 894\text{--}974$ кг/мм², анатаза $VH_{100} = 616\text{--}698$ кг/мм² [5]. Структура рутила характеризуется двойникованием по плоскости (011) под углом 120° [6].

Диоксид титана весьма часто применяется в виде наноразмерных частиц и тонкослойных покрытий [7]. Тонкие пленки диоксида титана обладают целым рядом ценных свойств, что позволяет их использовать в фотогальванике, в качестве самоочищающихся антибактериальных покрытий и в сенсорных устройствах, для решения задач прикладной микробиологии и биотехнологии, а также для очищения сточных вод и воздуха [8, 9]. В [10] было показано, что добавление TiO₂ в ткани способствует созданию антибактерицидного материала. Халаты, сшитые из этой ткани, можно обрабатывать ультрафиолетом для дезинфекции после рабочего дня. В работах [11–13] авторам удалось найти применение фотокаталитическому эффекту наночастиц TiO₂ в фотодинамической терапии для разрушения раковых клеток.

Несмотря на активное использование пленок и наночастиц диоксида титана в различных отраслях промышленности и в медицине, в настоящее время не сформировались методы направленного синтеза наночастиц с заданной модификацией атомной структуры, например аморфной структуры, анатаза или рутила. Тем более не разработаны методы направленного синтеза диоксида титана с заданными размером и формой наночастиц, с заданными размером и формой пор [7].

Цель данной работы – синтез покрытий диоксида титана вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом и выявление влияния режимов плазменного ассистирования на структуру, состав и свойства сформированных покрытий.

Материал и методика

Напыление диоксида титана осуществляли на установке «КВИНТА», применяемой для вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления тонких пленок и покрытий [14]. Установка оснащена электродуговым испарителем с катодом Ø 80 мм и протяженным источником газовой плазмы «ПИНК-П» на основе несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодами [15–18]. В качестве материала испаряемого катода использовался технически чистый титан

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (Грант № 24-69-00074).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 621.3.049.7; 519.876.5

DOI: 10.17223/00213411/68/12/17

Численное моделирование отвода летучих компонентов при обжиге металлокерамических корпусов для интегральных микросхем*И.А. Жуков¹, А.Ю. Крайнов¹, К.М. Моисеева¹, Е.В. Ермолаев^{2,3},
Р.Ш. Ахметгалиев^{1,2}, В.А. Егошин^{1,2,3}, Ш.Н. Шугаев^{1,2,3}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *АО «Завод полупроводниковых приборов» (АО «ЗПП»), г. Йошкар-Ола, Россия*³ *Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Россия*

Проведено численное моделирование процесса удаления летучих компонентов из пористого пространства под керамической платой и из области над керамической платой, прикрытой шероховатой пластинкой-грузиком при обжиге металлокерамических плат. Задача решалась с использованием пакета ANSYS Fluent. В качестве предположения принято, что шероховатость описывается структурированным набором конусов различной высоты. Показано, что увеличение высоты пиков шероховатости приводит к снижению избыточного давления над и под керамической платой.

Ключевые слова: численное моделирование, шероховатость, удаление летучих компонентов, металлокерамические платы, давление газа.

Введение

Изготовление металлокерамических изделий из высокотемпературной керамики для микроэлектроники, в том числе металлокерамических корпусов (МКК) для интегральных микросхем, включает в себя множество этапов, начиная от подготовки материалов и получения шликерных масс и заканчивая финишным покрытием.

Как известно, при изготовлении металлокерамических корпусов, многокристалльных модулей, подложек, нагревательных элементов, керамических оснований для оптоэлектроники и фоточувствительных элементов, а также других изделий из высокотемпературной керамики для электроники и электротехники важной стадией является получение керамической платы, представляющей собой до процесса спекания монолитную многослойную структуру, которая затем спекается в специальных печах по заданной термограмме процесса спекания в среде формирующего газа. На этом этапе из многослойной структуры удаляются органические вещества, происходит разложение отдельных компонентов, структурно-фазовые превращения и, в конечном итоге, спекание частиц керамики. В результате этих процессов линейные размеры заготовки (платы) существенно уменьшаются (более 10%), а в некоторых случаях ввиду неоднородности многослойной структуры (плотность топологии, неоднородность материала, разнотолщинность и т.д.) происходит деформация плат на недопустимые для дальнейшего использования величины. Для исключения или уменьшения деформации плат спекание плат проводится в естественном состоянии путем применения плоской подложки с заданной шероховатостью из тугоплавких металлов (Nb, Mo, Ta, W или Re). В качестве грузов под размер спекаемой заготовки используют керамические пластинки, которые благодаря своему весу препятствуют сильным деформациям заготовок при спекании. Кроме того, процесс спекания осуществляется медленно для обеспечения квазистационарного процесса удаления летучих компонентов из материала заготовок плат в казизотермических условиях.

Одной из причин возникновения деформаций заготовок плат в процессе спекания может служить неравномерное выделение летучих компонентов из материалов заготовки платы. Неравномерность возникает из-за увеличенного сопротивления выхода летучих компонентов в пористом

* Работа выполнена в рамках государственного задания № FSWM-2025-0010 «Физико-химические закономерности формирования структурно-фазового состояния и физико-механических свойств композиционных керамических материалов, стойких к интенсивным термомеханическим воздействиям и износу».

Математическое моделирование вынужденной конвекции в осесимметричном канале при локальном нагреве стенки*

А.А. Шнейдер¹, М.А. Шеремет¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Данная работа посвящена математическому моделированию вынужденной конвекции в круглой трубе при кольцевом нагреве стенки. Рассмотрены два условия локального нагрева: постоянная температура и постоянный тепловой поток на участке стенки. Решение было получено на основе численного моделирования с использованием метода конечных разностей второго порядка точности. Установлены математические соотношения, отражающие характер зависимости среднего числа Нуссельта на участке нагрева от чисел Рейнольдса ($50 \leq Re \leq 500$) и Прандтля ($0.7 \leq Pr \leq 100$).

Ключевые слова: вынужденная конвекция, цилиндрический канал, локальный кольцевой нагрев, среднее число Нуссельта, корреляционные соотношения.

Введение

Конвективный теплоперенос в каналах играет важную роль в многочисленных технических приложениях, таких как, например, теплообменники, системы охлаждения и трубопроводы. Необходимо различать условия смешанной и вынужденной конвекции, поскольку они существенно влияют на формирование течений и распределение температурных полей [1–3]. Основным показателем интенсивности теплообмена является среднее число Нуссельта (\overline{Nu}), которое зависит от геометрических параметров, термодинамических свойств рабочей среды и режима течения [4–6].

В задачах вынужденной конвекции вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрических каналах на интенсивность теплообмена существенно влияют числа Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr) [7, 8]. Исследования демонстрируют, что снижение температуры на входе и увеличение Re способствуют усилению теплопередачи [7], а учет переменных теплофизических свойств, например вязкости [8], приводит к более высоким значениям среднего числа Нуссельта по сравнению с моделями с постоянными свойствами.

Еще одним критическим фактором, определяющим характер теплообмена, являются граничные условия на стенке. При постоянном тепловом потоке число Нуссельта, как правило, выше, чем при постоянной температуре, что свидетельствует о более эффективном теплообмене [9]. Исследование развития гидродинамического и теплового пограничных слоев при постоянном тепловом потоке выявило наличие трех различных областей на начальном участке канала [10]. Влияние типа граничного условия значительно зависит от числа Прандтля: при низких Pr значения \overline{Nu} могут отличаться до 20% [11].

Особый интерес вызывают асимметричные условия теплового воздействия, в том числе кольцевой нагрев, характерный для тепловых труб. Такие условия существенно изменяют структуру течения, смещая максимум осевой скорости и вызывая циркуляцию, что влияет на интенсивность теплообмена [12–17]. Так, в горизонтальной трубе со сверхкритическим CO_2 было показано, что неравномерный нагрев по окружности или длине может ухудшать теплоотдачу на 13–68% по сравнению с равномерным нагревом [14]. Более того, исследование по выбору оптимального распределения теплового потока демонстрирует, что при восходящем профиле теплового потока средние значения числа Нуссельта оказываются выше, чем при нисходящем профиле [16]. Важно отметить, что при асимметричных тепловых условиях, характерных для многих реальных устройств, классические двумерные осесимметричные модели становятся неприменимы, что требует проведения полноценного 3D-моделирования, учитывающего асимметрию изотерм и реальное распределение теплового потока [17].

Численное моделирование остается основным инструментом анализа таких процессов. Для этого успешно применяется подход на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность скорости», который значительно упрощает математическую модель [18]. Несмотря на это, прямое численное моделирование для каждого конкретного случая сопряжено со значитель-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-49-00221).

Экспериментальное исследование плотности орошения при сбросе жидкого хладагента с борта БПЛА*

В.А. Архипов¹, С.А. Басалаев¹, И.С. Бондарчук¹,
Н.Н. Золоторёв¹, О.В. Матвиенко^{1,2}, К.Г. Перфильева¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

² *Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*

Представлены метод и результаты экспериментального исследования плотности орошения в зависимости от коэффициента поверхностного натяжения жидкого хладагента и высоты его сброса из модельного сливного устройства, установленного на борту БПЛА. Получены пространственные распределения плотности орошения и значения эффективного радиуса зоны орошения при варьировании высоты сброса в диапазоне $H = 10\text{--}14$ м и коэффициента поверхностного натяжения жидкости в диапазоне $\sigma = 71.2\text{--}31.0$ мН/м.

Ключевые слова: модельное сливное устройство, жидкий хладагент, высота сброса, поверхностно-активное вещество, коэффициент поверхностного натяжения, пространственное распределение плотности орошения, эффективный радиус зоны орошения.

Введение

Одними из основных параметров, характеризующих эффективность воздействия жидкого хладагента при авиационном тушении пожара, являются плотность орошения (удельный расход жидкости) Q – объем жидкости, поступающей на единицу площади поверхности, и интенсивность орошения G – объем жидкости, поступающей на единицу площади поверхности в единицу времени.

Результаты определения критических значений Q и G , необходимых и достаточных для тушения конкретного типа пожара, полученные в условиях модельных (имитационных) экспериментов, подкрепленные результатами тушения реальных пожаров с использованием самолетов Ил-76, Бе-200, вертолетов Ми-8, Ка-32, опубликованы в целом ряде работ. Анализ опубликованных результатов [1–5] показывает, что среднее значение критической плотности орошения зависит от типа пожара, физических характеристик хладагента, условий и высоты его сброса и варьируется в широком диапазоне $Q = 0.2\text{--}3.5$ л/м².

В качестве жидкого хладагента наиболее широко применяется вода. Однако ее использование для тушения пожаров ограничено низкой смачивающей способностью, обусловленной высоким значением коэффициента поверхностного натяжения. Это снижает эффективность тушения тлеющих и волокнистых материалов, которые могут гореть при низком уровне содержания кислорода [6]. Повышение смачивающей способности воды эффективно достигается за счет введения в состав жидкого хладагента поверхностно-активных веществ (ПАВ), снижающих поверхностное натяжение на межфазной границе [6, 7].

В статье [8] для верификации математических моделей пожаротушения предложен метод моделирования сброса жидкого хладагента при авиационном тушении пожаров путем использования недорогих беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Наряду с возможностью моделирования, использование БПЛА может представлять самостоятельный интерес в подавлении ограниченных очагов пожара и при оценке параметров, влияющих на эффективность тушения пожара.

В настоящей работе представлены метод [9] и результаты экспериментального исследования влияния высоты сброса и коэффициента поверхностного натяжения жидкого хладагента на пространственное распределение плотности орошения и эффективный радиус зоны орошения, характеризующий область поверхности, в которую попадает ~ 40% сбрасываемого хладагента.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.

Синтез горением композиционных ферросплавов в режиме термического сопряжения*

М.Х. Зиатдинов¹, А.С. Жуков¹, А.Е. Куликов¹, Г.А. Байгонакова¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты изучения термически сопряженных процессов синтеза горением различных сплавов. Показано, что термическая активация процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза систем с низкой экзотермичностью на основе сплавов железа возможна с помощью различных методов: с использованием физического тепла; механическим активированием исходной порошковой смеси; перераспределением химической энергии; химическим нагревом смеси порошков термитными смесями, а также с использованием так называемой «химической печи». На примерах показаны возможности различных видов термического активирования для безгазового и фильтрационного режимов синтеза горением с участием различных сплавов.

Ключевые слова: *самораспространяющийся высокотемпературный синтез, нитриды, бориды, азотированные ферросплавы, термическое сопряжение, фильтрационное горение, безгазовое горение, композиционные ферросплавы.*

Введение

В настоящее время известно большое количество экзотермических химических реакций получения тугоплавких неорганических соединений, которые сопровождаются выделением тепловой энергии и формированием твердых веществ. Многие из таких реакций, обычно наиболее экзотермические, используются в классических металлотермических и СВС-процессах. [1, 2]. Кроме того, известно множество реагирующих порошковых смесей, перспективных с технологической точки зрения, экзотермичности которых недостаточно для осуществления в них химических реакций в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [3].

Активировать процесс синтеза горением в таких слабоэкзотермических смесях можно путем введения в реагирующую систему дополнительной тепловой энергии, или осуществить рекуперацию имеющегося в системе тепла. В традиционном процессе синтеза горением сейчас используются различные варианты активирования слабоэкзотермических смесей:

- Рекуперация выделяющегося тепла.
- Предварительная мехактивация экзотермической смеси.
- Предварительный электронагрев СВС-шихты.
- Химический нагрев экзотермической шихты термитными смесями.
- Применение химической печи.

Перераспределение тепловой энергии путем ее рекуперации во время осуществления СВС-процесса в слабоэкзотермических смесях порошков обычно осуществляется в режиме принудительной фильтрации газа. При синтезе в режиме безгазового горения спутная продувка СВС-смеси порошков осуществляется газом, не участвующим в химических реакциях, обычно аргоном. При получении нитридов и композиций на их основе применяют вынужденную фильтрацию реагирующим газом, обычно азотом или его смесью с инертным газом [4].

Механическое активирование порошковых экзотермических смесей обычно осуществляют с использованием планетарных мельниц различных конструкций [5]. Такая предварительная мехактивация экзотермической СВС-шихты позволяет осуществлять синтез в режиме самоподдерживающегося горения в системах с низкой экзотермичностью и одновременно повышать степень выхода целевого соединения.

Дополнительное тепло в СВС-экзотермическую смесь может добавляться в виде физического или химического тепла. Физическое тепло вводится путем предварительного увеличения температуры исходной порошковой смеси в электропечи. При таком осуществлении синтеза горение можно осуществлять как в режиме послыонного распространения волны синтеза, так и в объемном режиме (в так называемом синтезе в режиме теплового взрыва).

* Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2025-607 от 01/07/2025).

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.178.16

DOI: 10.17223/00213411/68/12/21

Механизм изнашивания стали Гадфильда при нагружении по схеме качения индентора с проскальзыванием*С.В. Станкевич¹, К.И. Эмурлаев¹, Д.И. Котов^{1,2}, В.Г. Буров¹, И.А. Батаев¹, З.Б. Батаева³¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия³ Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследования механизма изнашивания стали Гадфильда в условиях трения качения с проскальзыванием. В качестве контртела использовались закаленные ролики из стали ШХ15СГ. Общее количество циклов фрикционного воздействия составило 1 млн. Полученная в результате экспериментов поверхность исследовалась методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Установлено, что разрушение поверхностного слоя стали Гадфильда носит стадийный характер. Интенсивная пластическая деформация и сопутствующие механохимические процессы (окисление, рост плотности дефектов) приводят к охрупчиванию материала. Это вызывает образование сети трещин, ориентированных как перпендикулярно, так и параллельно направлению скольжения. Основным механизмом износа является отслаивание чешуеобразных частиц деформированного и окисленного материала толщиной около 1 мкм. Полученные данные согласуются с концепцией формирования вторичных структур на поверхности трения и вносят вклад в понимание поведения стали Гадфильда при комбинированном качении с проскальзыванием.

Ключевые слова: сталь Гадфильда, изнашивание, трение качения с проскальзыванием, вторичные структуры.

Высокомарганцовистые стали с содержанием 7–20 мас.% Mn, патент на которые был получен в 1883 г. английским металлургом Робертом Эбботом Гадфильдом, благодаря особым механическим и триботехническим свойствам в течение длительного времени относятся к числу наиболее востребованных литейных легированных сплавов [1]. Из самой распространенной стали 110Г13Л, входящей в эту группу и именуемой сталью Гадфильда, получают сотни типов изделий, эксплуатация которых связана с высокими нагрузками и необходимостью обеспечения длительной работоспособности. Предложенный Робертом Гадфильдом состав стали в течение полутора веков остается почти неизменным. Этот факт свидетельствует об уникальности данного сплава. Отличительной особенностью стали 110Г13Л, обеспечивающей ее высокую эксплуатационную стойкость при деформационном воздействии, является существенное упрочнение под воздействием ударных и ударно-усталостных нагрузок с высокими значениями давления. Например, железнодорожные крестовины, изготовленные из стали 110Г13Л, в процессе эксплуатации упрочняются на глубину от 9 до 20 мм [2]. Уровень твердости изделий в зоне катания колес подвижного состава достигает 350–500 НВ.

Основным фактором, который объясняет широкое применение стали Гадфильда при изготовлении таких изделий, как зубья ковшей карьерных экскаваторов, звенья гусениц тракторов и танков, щеки, била и молотки камнедробилок, черпаки драг, а также иные детали горно-шахтной и строительной техники, является высокая стойкость в условиях абразивного изнашивания. Анализ поведения стали 110Г13Л при эксплуатации в присутствии абразива выполнен во множестве работ отечественных и зарубежных специалистов [3, 4]. Изучено влияние дополнительного легирования стали, присутствия карбидной фазы, размеров аустенитного зерна, режимов термической обработки и других факторов на износостойкость стали. При проведении многочисленных экспериментальных работ выявлены особенности поведения стали, связанные со свойствами абразивной среды, проведен анализ механизмов микрорезания и пластического оттеснения поверхностных микрообъемов материала закрепленными и незакрепленными частицами абразива. Показано, что эксплуатация высокомарганцевых сталей в условиях сухого трения скольжения может сопровождаться измельчением зеренной структуры и деформационно-индуцированными фазовыми превращениями $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$. Такой эффект способствует повышению твердости в деформированном слое до 576 НВ, что превышает исходную твердость стали Гадфильда в 3 раза [5]. Однако в литературе анализу схемы изнашивания, совмещающей в себе трение качения и скольжения, т.е. трение качения с проскальзыванием, внимание уделялось гораздо в меньшей степени, чем абразивному изнашиванию.

* Работа выполнена в рамках проекта FSUN-2024-0005 «Структурные преобразования в тонких поверхностных слоях металлических сплавов при экстремальном тепловом и деформационном воздействиях».

УДК 620.181.5

DOI: 10.17223/00213411/68/12/22

Стойкость к окислению поверхностных слоев на стали 12X18H9T, легированных бором и цирконием*

Е.А. Пухова¹, Е.А. Дробяз¹, В.А. Батаев¹¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрен метод вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей циркония и бора на заготовки из стали 12X18H9T с целью повышения стойкости поверхностных слоев к высокотемпературному окислению. Показано, что при введении 20% Zr и 30% В формируются бориды $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ и интерметаллиды ZrFe_2 , а также твердые растворы α -(Cr, Fe) и γ -(Fe, Ni), что обеспечивает толщину наплавленного слоя около 2.5 мм. Исследования окислительной стойкости при 950 °С в течение 100 ч продемонстрировали снижение прироста массы модифицированных образцов до 1.3467 г/м² против 13.5223 г/м² для необработанной стали, т.е. более чем десятикратное улучшение окислительной стойкости. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности данного метода в улучшении жаростойкости аустенитных хромоникелевых сталей.

Ключевые слова: аустенитные стали, вневакуумная электронно-лучевая наплавка, бориды хрома, окислительная стойкость.

Одна из актуальных задач, характерных для современного материаловедения, связана с разработкой металлических сплавов, предназначенных для эксплуатации в особых условиях внешнего воздействия. Широкое распространение в производстве деталей машин и элементов конструкций получили хромоникелевые аустенитные стали, характеризующиеся высоким уровнем пластичности, трещиностойкости, коррозионной стойкости. Уникальный комплекс механохимических свойств объясняет востребованность этих сталей в химическом машиностроении, нефтегазовом секторе экономики, энергетике, при производстве медицинских инструментов. Во многих случаях возникает необходимость эксплуатации сплавов при нагреве до 600 °С и выше [1, 2]. Повышение жаростойкости хромоникелевых аустенитных сталей, в частности стали 12X18H9T, относится к числу важных технических задач, поскольку эксплуатация этих материалов в высокотемпературном состоянии сопровождается постепенной деградацией структуры, снижением функциональных свойств материалов, а следовательно, долговечности изготовленных из них изделий. Результатом интенсивной диффузии кислорода и химических элементов, входящих в состав сплавов, является формирование оксидных пленок, содержащих железо, хром, никель (Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и NiO), и более сложных соединений [3]. К числу перспективных методов повышения жаростойкости металлических материалов следует отнести вневакуумную электронно-лучевую наплавку порошковых смесей, позволяющую создавать поверхностные слои с контролируемым химическим составом за счет введения легирующих элементов, обеспечивающих рост окислительной стойкости [4].

Цель работы – изучение влияния легирования бором и цирконием на структуру и жаростойкость поверхностных слоев на заготовках из стали 12X18H9T, полученных методом наплавки материалов пучками электронов, выведенными в воздушную атмосферу. Выбор в качестве модифицирующих добавок бора и циркония обусловлен возможностью образования соединений, обеспечивающих термическую стабильность поверхностных слоев, улучшения адгезионных свойств оксидных пленок и замедления диффузии кислорода в сталь за счет формирования плотного оксида циркония [5].

Для модифицирования поверхностного слоя стали 12X18H9T использовали смесь порошков циркония и бора в соотношении 20/30 мас.%. Защиту расплава от окисления обеспечивал флюсующий компонент, функцию которого выполнял фторид магния (MgF_2). Наплавку порошка выполняли при токе пучка электронов $I = 25$ мА. Скорость продольного перемещения образца составляла 10 мм/с, частота сканирования пучка в поперечном направлении – 50 Гц, размеры образцов – 100×50×10 мм.

В результате наплавки модифицирующей смеси формируется поверхностно легированный слой толщиной ~ 2.5 мм (рис. 1, а), характерными структурными составляющими которого являются бориды типа $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$ (рис. 1, б). Толщина переходной зоны между поверхностным слоем с выделившимися в нем кристаллами боридов и основным металлом, не переходившим в расплавленное состояние, составляет ~ 0.3–0.5 мм (рис. 1, а). Размеры кристаллов боридов в данной зоне меньше, чем вблизи поверхности (рис. 1, в). Кроме боридов методом рентгеновской дифракции в наплавленном слое зафиксировано присут-

* Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-00066, <https://rscf.ru/project/23-79-00066/>.

ПЕРСОНАЛИЯ

УДК 94(47).084.9

DOI: 10.17223/00213411/68/12/23

**Академик Владимир Евсеевич Зуев
и развитие российских классических университетов
в советский и постсоветский период***Г.В. Майер¹, С.А. Некрылов¹, А.О. Степнов¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Рассматривается жизненный путь академика В.Е. Зуева. Подчеркивается, что его личностные качества, сформированные рабочим и фронтовым опытом, тяжелой студенческой молодостью, во многом обусловили его высокую адаптивность в сложной системе советской науки. Создание при его решающем участии альтернативного вузовско-академического центра науки в Томске было мотивировано дисбалансами и асимметриями, складывавшимися в науке СССР с 1920-х гг. Показательно, что в недрах советской действительности формировались навыки управления наукой в условиях уже не советской системы. Эти навыки позволили В.Е. Зуеву в 1990-е гг. сохранить статус патриарха академической науки. Академик во многом определил сохраняющуюся сегодня структуру вузовско-академического центра в Томске, интегральной частью которого является альянс местных институтов Академии наук и Томского государственного университета.

Ключевые слова: *классические университеты, Академия наук, Сибирь, социальная история науки, В.Е. Зуев.*

В советскую эпоху ландшафт российской науки заметно изменился. В это время менялось лицо науки, демократизировался студенческий и профессорско-преподавательский состав вузов, которые пополнялись представителями ранее непривилегированных классов. В университеты приходили люди с особым мировоззрением, ценностными установками, представлениями о приоритетах государственного развития, а центр тяжести научной жизни быстро, особенно заметно в период после окончания Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., смещался в сторону отраслевых научно-исследовательских институтов и Академии наук, достигшей тогда пика своего развития и, по большому счету, ставшей своеобразным государством внутри государства.

Актуальным в современной историографии науки и техники является изучение именно влияния социальных процессов, происходивших внутри научных сообществ, на траектории развития науки и высшей школы. Данное направление научных поисков позволяет отчасти выйти за пределы и преодолеть негативные последствия традиционного подхода, в котором с советских времен внимание акцентировалось на государственной политике и институциональной динамике ([1–3] и др.). И хотя значение последних факторов в целом не следует преуменьшать, все же органические ресурсы развития науки, связанные с человеческим фактором, социальным портретом приходящих в вузы новых поколений, представляются фундаментальными, зачастую принципиальным образом определяющими пути развития науки в меняющихся политических, социально-экономических и культурных условиях.

В данном аспекте жизненный путь действительного члена АН СССР (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Государственной премии и премии Совета министров СССР Владимира Евсеевича Зуева (1925–2003) является заслуживающим особого внимания. С одной стороны, В.Е. Зуев – продукт своей эпохи, человек, получивший уникальный шанс для самореализации в условиях развития наукоцентричной сверхдержавы, в которой власть использовала инструмент социальной мобильности как способ укрепления своей легитимности, а образ ученого, особенно физика, был долгое время эталонным с точки зрения социального престижа и жизненного успеха. С другой стороны, он был человеком, который, как принято говорить, сделал себя сам, и его путь отнюдь нельзя назвать легким. Напротив, избранные им жизненные и профессиональные стратегии зачастую были рискованными. Судьба В.Е. Зуева могла бы сложиться иначе, если бы он не

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-18-00048, <https://rscf.ru/project/23-18-00048/>.

УКАЗАТЕЛИ

**Указатель статей и кратких сообщений,
опубликованных в журнале
«Известия вузов. Физика»
за 2025 г.**

Выпуск 1

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Прохоров Е.С. Детонационное сжигание стратифицированного газового заряда, контактирующего с воздухом..... | 5 |
| Акулова Д.В., Шеремет М.А. Сравнительный анализ влияния доброкачественного и злокачественного новообразований на тепловое состояние ткани на основе одномерной модели Пеннеса..... | 14 |

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Куксаузен И.В., Победенная З.В., Куксаузен Д.А. Исследование сопротивления циклическим деформациям в олиго- и монокристаллах сплавов FeMnNiAlX (X = C, Ti, Cr, CrMo) с эффектом сверхэластичности..... | 23 |
| Савельева А.С., Понизовная Д.А., Мамонтов Г.В. Влияние добавок SeO ₂ на физико-химические и каталитические свойства Ag/Fe ₂ O ₃ -катализаторов глубокого окисления толуола..... | 32 |
| Арефьев К.П., Агеев Б.Г., Батрагин А.В., Бондаренко С.Л., Бордулев Ю.С., Лаптев Р.С., Савчук Д.А., Сапожникова В.А., Стучебров С.Г., Устинова И.Г., Цуй Цзян, Ломыгин А.Д. Измерения характеристик природного композита древесины методом аннигиляции позитронов на основе имитационной модели годовичного кольца..... | 40 |
| Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С., Гришков А.А., Коваль Н.Н., Торба М.С., Картавцов Р.А. Влияние дополнительной инжекции электронов на параметры орбитронного тлеющего разряда в ускорителе на основе несамостоятельного ВТР..... | 52 |
| Нифонтов А.С., Астафурова Е.Г. Влияние зернограничной σ -фазы на закономерности водородного охрупчивания многокомпонентного сплава CoCrFeMnNi..... | 59 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Двужилов И.С., Двужилова Ю.В. Предельно короткие оптические импульсы в анизотропном фотонном кристалле с дефектом структуры..... | 69 |
| Беляев Б.А., Тюрнев В.В., Шабанов Д.А. Исследование оптических резонаторов и полосно-пропускающих фильтров на структурах из чередующихся слоев кварца и серебра..... | 76 |

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Юдин Н.Н., Подзывалов С.Н., Слюнько Е.С., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю., Баалбаки Х., Грибенюков А.И., Габдрахманов А.Ш., Кулеш М.М., Антипов О.Л. Ионная очистка поверхностей Ge-подложек перед ионно-лучевым напылением тонких пленок..... | 90 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

Выпуск 2

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Майер Г.В., Чайковская О.Н., Базыль О.К., Бочарникова Е.Н. О возможности проявления квантово-запутанных электронно-возбужденных состояний в многоатомных молекулах..... | 5 |
| Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Распространение плоской электромагнитной волны через цилиндрический метаматериал конечной длины в модели молекулярной оптики..... | 11 |
| Носанов В.С., Аксенова Ю.В. Спектроскопическое исследование эффективности генерации синглетного кислорода галогенпроизводными металлокомплексов дипиррометенов..... | 20 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Гладков С.О., Нагибин Н.С. О вычислении коэффициента лобового сопротивления хорошо обтекаемого тела..... | 29 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Шляров В.В., Серебрякова А.А. Физические факторы, способствующие повышению усталостной долговечности силумина методами комплексной электронно-ионно-плазменной обработки37

Фролов Д.О. К теории пластичности аморфных и поликристаллических сред.....53

Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Литовченко И.Ю., Чапайкин А.С., Семин А.П., Миненко С.С. Электронно-микроскопическое исследование структуры карбидного каркаса слоя наплавки быстрорежущей стали P18Ю65

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. О вынужденных колебаниях электрического поля в приземном слое атмосферы на гравитационно-волновых частотах релятивистских двойных звездных систем75

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Заворотний А.А., Ершов А.А., Филиппов В.В., Лузянин С.Е. Контроль однородности полупроводниковых пленок в процессе проведения зондовых измерений удельной электропроводности82

Васильев В.В., Вишняков А.В., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Стучинский В.А. Влияние геометрического фактора пикселя на пространственное разрешение линейных фотоприемников СВИК-диапазона на основе материала кадмий – ртуть – теллур92

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Левин Ю.К. Расчет заряда объемных нанопузырей в воде при балансе давлений Кулона и Лапласа.....99

Вы п у с к 3

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Лозовой К.А., Дирко В.В., Коханенко А.П., Кукенов О.И., Плотников Н.В., Акименко Н.Ю., Войцеховский А.В. Новые двумерные графеноподобные материалы и гетероструктуры.....5

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Валиулина Л.И., Валиев Р.Р., Насибуллин Р.Т., Мерзликин Б.С., Тугульдурова В.П., Черепанов В.Н. Вычисление матричных элементов оператора неадиабатичности с учетом эффекта ангармоничности молекулярных колебаний16

Шольгин И.О., Фомин Д.В., Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Чернев И.М., Поляков А.В. Формирование и свойства фотодиодных структур Al/Mg₂Si/Si/Au-Sb22

Пашаев А.М., Велиев Н.А., Мамедов И.Х., Аскеров К.А., Мусаев А.А., Аллахвердиев К.Р. Применение ИК-абсорбционной фурье-спектроскопии для идентификации сырых нефтей Апшеронского полуострова Азербайджана32

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Перевозников Е.Н. Критериальный анализ динамики процесса теплопроводности на примере модельной системы40

Лобода Е.Л., Медведева Т.И., Касымов Д.П. Исследование динамики температурного поля на торцевой поверхности строительных материалов на основе древесины при воздействии лучистого теплового потока.....47

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Магкоев Т.Т. Исследование валентной зоны легированного железом германия методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и теории функционала плотности54

Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В. Диэлектрические свойства композита на основе пористого тефлона, заполненного сегнетоэлектриком SC(NH₂)₂.....60

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Вагнер Д.В., Карева К.В., Журавлев В.А., Минин Р.В., Доценко О.А., Баскакова К.И., Кеда И.С. Фазовый состав, структура и магнитные свойства ферритов никеля, полученных методом золь-гель-горения.....66

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Абдулвагабова С.К., Эфендиева И.К. Исследование 0⁺-возбуждений в ядрах с учетом остаточных сил.....74

Шатохин В.В., Авдюшев В.А. Исследование точности определения орбит космических аппаратов ГЛОНАСС при различных обстоятельствах наземных наблюдений81

Кулагин А.Е., Шаповалов А.В. Квазиклассический подход для обобщенного уравнения Хауса, описывающего излучение в резонаторе лазера с импульсной накачкой.....90

Выпуск 4

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вологжин М.А., Краснобаева Л.А., Шаповалов А.В. Исследование динамики конформационного возмущения в молекуле ДНК в модели Мута..... | 5 |
| Зарипов Р.Г. Обобщение соотношения неопределенностей Мандельштама – Тамма с высшими центральными моментами..... | 14 |
| Бреев А.И., Чалый Н.А. Спектр квазисвязанных состояний в графене в окрестности сверхкритической кулоновской примеси..... | 21 |

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Павлова А.А., Сусяев В.И., Коровин Е.Ю., Мазилев Д.А. Расчет микроволнового спектра коэффициента отражения от слоя магнитной жидкости с добавлением МУНТ..... | 28 |
| Алмаев Д.А., Цымбалов А.В., Копьев В.В., Кукенов О.И. Фотодетекторы УФ-излучения на основе пленок Ga ₂ O ₃ с высоким быстродействием..... | 35 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Безлепкина Н.П., Базыль О.К., Чайковская О.Н., Майер Г.В. Природа электронно-возбужденных состояний и спектрально-люминесцентные свойства сульфаниламида в воде..... | 42 |
| Валиулина Л.И., Валиев Р.Р., Насибуллин Р.Т., Черепанов В.Н. Предсказание константы скорости внутренней конверсии методом машинного обучения..... | 53 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Гладков С.О., Зо Аунг. О новом граничном условии в задаче обтекания шара..... | 60 |
| Мельников А.Ю., Звгинцев В.И. Классификация дозвуковых режимов течения вязкого газа в канале постоянного сечения..... | 73 |

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Особенности механизма высокоскоростного проникания цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама в металлическую преграду..... | 81 |
| Грабко Г.И., Басс М.С., Батухтин С.Г. Определение параметров энергетического спектра локализованных состояний сэндвич-структуры Al–Pb ₃ O ₄ –Al..... | 87 |
| Точиев Дж.С., Долбин И.В., Сапаев Х.Х. Теоретическое описание упругости композитов на основе полиамида-6 в рамках модели «термита»..... | 94 |

Выпуск 5

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Семёнов А.Д., Шкурина Е.Д., Печерская Е.А., Голубков П.Е., Александров В.С., Якушов Д.В. Расчет динамических характеристик линеаризованной модели процесса микродугового оксидирования..... | 5 |
| Левин Ю.К. Энергия нанопузырей с гидратной оболочкой..... | 18 |
| Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Хабибуллин М.В. Экспериментально-теоретическое исследование процесса высокоскоростного взаимодействия стального ударника с двухслойным металлокерамическим материалом..... | 24 |
| Кеда И.С., Доценко О.А., Алмаев Д.А., Вагнер Д.В. Электрофизические свойства акриловых композитов с многостенными углеродными нанотрубками..... | 31 |

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ершков М.Н., Шепелев А.Е., Солохин С.А., Сметанин С.Н., Антипов А.А., Путилов А.Г., Канаев А.Ю., Оболдуев Д.А. Сравнительное исследование генерации лазера на композитном Nd ³⁺ :YAG / Cr ⁴⁺ :YAG-керамическом элементе и лазера на монокристаллическом Nd ³⁺ :YAG-элементе с пассивным модулятором на кристалле LiF:F ²⁻ | 39 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Коровин Е.Ю., Матыскин К.Е., Атутов Е.Б., Павлова А.А., Трофимов Е.А., Сусяев В.И. Электромагнитные свойства защитных экранов для снижения воздействия электромагнитного излучения на операторов носимых устройств подавления БПЛА..... | 48 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Юдин Н.Н., Соснин Э.А., Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А., Кузнецов В.С., Антипов О.Л., Слюнько Е.С., Зиновьев М.М., Подзывалов С.Н., Кальсин А.Ю., Габдрахманов А.Ш., Лысенко А.Б., Кулеш М.М. Влияние плазменного травления на порог оптического пробоя нелинейных кристаллов ZnGeP ₂ в области длин волн ~ 2.1 мкм..... | 56 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г. Физически-информируемые нейронные сети для оценки интенсивности атмосферной оптической турбулентности | 66 |
| Чайковская О.Н., Бочарникова Е.Н., Соломонов В.И., Макарова А.С., Спирина А.В., Чайковский С.А., Соколова И.В. Воздействие электронного пучка на трансформацию фенола в воде в присутствии гуминовых веществ | 74 |

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Скрипник А.П., Шиканов А.Е. Восстановление поля кольцевого магнита по данным измерений вектора индукции | 84 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Адуев Б.П., Лисков И.Ю., Митрофанов А.Ю., Нурмухаметов Д.Р. Особенности зажигания микрочастиц бурого угля лазерным излучением с различной структурой | 90 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

Выпуск 6

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Филиппов А.И., Зеленова М.А. Акселерационные эффекты в диссипативных течениях | 5 |
| Борзенко Е.И., Гарбузов Д.Н., Ефремов М.А. Влияние конфигурации двухлопастной мешалки на картину течения вязкой жидкости в смесителе | 14 |
| Шелехов А.П., Корольков В.А., Богушевич А.Я. Численное моделирование парения малоразмерных БПЛА коптерного типа в турбулентной атмосфере | 21 |

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Шостак Н.А., Самарин М.А. Модель процесса образования конденсатогидратов | 30 |
| Глазунова Е.В., Андрушина И.Н., Шилкина Л.А., Бобылёв В.А., Лымарь Д.В., Вербенко И.А., Резниченко Л.А. Влияние условий приготовления на формирование кристаллической структуры и микроструктуры мультиферроика манганита-ниобата свинца | 38 |
| Муратов Т.Т. Влияние локальных тепловых колебаний на генерацию хемозлектронов в гетероструктурах | 47 |
| Лучин А.В., Гуртова Д.Ю., Астафурова Е.Г. Влияние дендритной ликвации на фазовый состав и механизмы деформации многокомпонентного сплава $Fe_{40}Mn_{40}Co_{10}Cr_{10}$ | 52 |
| Ахметов А., Смолин И.Ю. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов литосферы вдоль геологического профиля «Кварц–1986» на территории Западно-Сибирской плиты | 61 |

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Зарипов Р.Г. Изменения двухпараметрической энтропии Маса в процессе самораспада неэкстенсивных систем | 70 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Брудный В.Н., Саркисов С.Ю. Разбавленные магнитные полупроводники на основе кристаллической матрицы GaSe с внедренными атомами хрома: полуметаллические электронные свойства и локализованные магнитные моменты | 76 |
| Тимофеев В.А., Скворцов И.В., Машанов В.И., Кириенко В.В., Гайдук А.Е., Блошкин А.А., Никифоров А.И., Уткин Д.Е., Хахулин С.А., Фирсов Д.Д., Комков О.С. Фотоотклик $p-i-n$ -фотодиодов GeSiSn/Si, сопряженных с фотонными кристаллами с микрорезонаторами | 85 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Третьяков А.К., Кистенёв Ю.В. Модифицированный генетический алгоритм повышенной сходимости для аппроксимации поверхности потенциальной энергии молекул | 95 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

Выпуск 7

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Козырев А.В., Семенюк Н.С. Критерии и динамика электрического пробоя газонаполненного диода на левой ветви кривой Пашена | 5 |
| Юшков Г.Ю., Гридилов В.Г. Немонотонная зависимость плотности плазмы от давления газа магнетронного разряда с мишенью из бора | 12 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Маркова А.А., Садовников С.А., Герасимова М.П., Яковлев С.В., Крючков А.В., Кравцова Н.С., Кистенев Ю.В. Использование узкополосного лазерного диода в задачах дистанционного газоанализа атмосферы | 21 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В., Федорова А.В. Твердорастворное упрочнение атомами азота монокристаллов $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$ высокоэнтропийного сплава..... | 29 |
| Степанов Н.П., Грабко Г.И. Релаксационные процессы в природном пирите, происходящие под воздействием постоянных и переменных электрических полей..... | 37 |
| Левин Ю.К. Методика расчета давления нанопузыря в воде..... | 45 |
| Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В. Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе иодида диизопропиламмония и микрочастиц меди..... | 50 |
| Ивченко В.А. Полевая ионная микроскопия структурной модификации поверхности ЖС36-ВИ после бомбардировки Ag^+ (30 кэВ)..... | 57 |
| Давыдов Р.В., Гольдберг А.А., Проводин Д.С., Давыдов В.В., Дудкин В.И. О влиянии поля модуляции и частотного сдвига спинового взаимодействия на формирование сигналов поглощения и дисперсии ядерного магнитного резонанса при их регистрации в слабых полях..... | 65 |

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков А.А., Крёков С.Д., Поминов К.И., Бурлаков И.Е. Высокоизбирательный полосно-пропускающий фильтр для входного мультиплексора спутниковой связи С-диапазона..... | 79 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Новиков П.Л., Павский К.В., Цынк П.Н. Моделирование димеризации атомов на поверхности структурированных подложек Si..... | 87 |
| Хахулин С.А., Коляда Д.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Тимофеев В.А., Скворцов И.В., Машанов В.И., Гайдук А.Е., Уткин Д.Е. Влияние прямоугольных алюминиевых наноантенн на оптическое излучение множественных квантовых ям GeSiSn/Si..... | 95 |

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Мусин А.И., Самойлов В.Н. Влияние атомов поверхности грани (001) Au на коэффициент ионного распыления: сравнение с теорией Зигмунда..... | 103 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

Выпуск 8**ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА**

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Гладков С.О. К вопросу о силе сопротивления шара при его вертикальном обтекании в поле силы тяжести..... | 5 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Серебренников М.А., Дин Ю., Егоров И.С. Особенности формирования и использования электронных пучков с широким энергетическим спектром..... | 11 |
| Коренблит С.Э., Аман Э.Г., Москаленко А.Д. Среда типа Грюнайзена для темной энергии и квинтэссенции..... | 19 |

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Янушоните Э.И., Панченко Е.Ю., Курлевская И.Д., Ефтифеева А.С., Чумляков Ю.И. Закономерности ориентационной зависимости сверхэластичности и эластокалорического эффекта в монокристаллах $\text{Ni}_{54}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27}$ и текстурированных поликристаллах $(\text{Ni}_{54}\text{Fe}_{19}\text{Ga}_{27})_{99.7}\text{B}_{0.3}$ | 32 |
| Ашхотов О.Г., Ашхотова И.Б., Магкоев Т.Т. Влияние фазовых переходов на процессы поверхностной сегрегации в твердых сплавах индий – олово..... | 42 |
| Боева Е.А., Лихоманова С.В. Исследование микротвердости поверхности йодно-поливинилспиртовых поляризаторов при различном времени йодирования..... | 48 |
| Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Внутренние напряжения и их источники в технической чистой УМЗ-меди после интенсивной пластической деформации..... | 52 |
| Черепанов Д.Н., Вовнова И.Г., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Влияние порогов на расширение октаэдрической дислокационной петли и генерацию точечных дефектов в пластически деформируемых ГЦК-кристаллах..... | 60 |
| Шкода О.А. Влияние механической активации на синтез трисилицида пентаниобия..... | 73 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Майер Г.В., Чайковская О.Н., Базыль О.К., Бочарникова Е.Н., Безлепкина Н.П. О физических механизмах формирования и особенностях интерпретации Стоксова сдвига в молекулах органических соединений..... | 80 |
| Татур В.В., Тихомиров А.А. Влияние паров ацетона и меркаптанов на измерение концентрации паров ртути анализатором на основе поперечного эффекта Зеемана..... | 86 |
| Герасимова М.П., Садовников С.А., Яковлев С.В., Крючков А.В., Филятов В.В., Кравцова Н.С., Маркова А.А., Кистенев Ю.В., Романовский О.А. Диодная лазерная система для дистанционного зондирования углекислого газа в атмосфере..... | 95 |

Выпуск 9

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Синюков С.А., Шаповалов А.В. Формирование структур в нелокальной одномерной модели Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с дробным лапласианом..... | 5 |
| Гасымов А.И., Джафаров Р.Г. К рассеянию векторных бозонов с обменом хиггсовской частицей в непертурбативном режиме..... | 14 |
| Титов Е.А., Жмудь В.А. Скорость счета парных совпадений для лазерного излучения при учете коллективных эффектов..... | 21 |
| Капшай В.Н., Павленко А.В., Гришечкин Ю.А. Двумерное двухчастичное квазипотенциальное уравнение в релятивистском конфигурационном представлении..... | 29 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Монсева К.М., Крайнов А.Ю., Лукашов О.Ю., Оберемок А.А. Расчет режимов проветривания рудников глубокого залегания..... | 43 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Николаев А.Г., Фролова В.П. Генерация многозарядных ионов в плазме субмикросекундного сильноточного вакуумного дугового разряда..... | 53 |
| Пинаев В.А., Константинов В.О., Щукин В.Г. Методика составления материального баланса при конверсии метана в электронно-пучковой плазме..... | 61 |

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков Ан.А., Говорун И.В., Савин Д.Р., Шумилов Т.Ю. Коэффициенты связи дисковых диэлектрических резонаторов и полосно-пропускающий фильтр С-диапазона на их основе..... | 66 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Данейко О.И., Матвиенко О.В. Влияние начальной плотности дислокаций на протекание процесса ползучести дисперсно-упрочненных материалов..... | 75 |
| Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Куксгаузен И.В., Федорова А.В., Куксгаузен Д.А. Эффект памяти формы при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситном превращении в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si..... | 85 |
| Шеховцов В.В., Улмасов А.Б. Формирование структуры и свойств композита MgAl ₂ O ₄ :ZrO ₂ , полученного методом плазменно-дугового синтеза..... | 93 |
| Осипов Д.А., Дитенберг И.А., Гриняев К.В. Особенности структурно-фазовой трансформации порошка Ti в условиях высокоэнергетической механической активации..... | 102 |

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Иванова А.И., Корнева О.С., Дектярев С.В., Гурулев А.В. Формирование глубоколегированных слоев при импульсно-периодической имплантации алюминия пучками ионов титана высокой плотности мощности..... | 108 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

Выпуск 10

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Каширский Д.Е., Горн Д.И., Войцеховский А.В. Моделирование сверхрешеточного барьера для nVn -структур на основе n -HgCdTe..... | 5 |
| Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П. Моделирование временных форм терагерцевых импульсов, генерируемых фотопроводящими полупроводниковыми антеннами..... | 14 |

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Козырев А.В., Кожевников В.Ю. О влиянии начальной скорости инжекции катодной плазмы на кинетику электронного и ионного потока в вакуумном разряде..... | 26 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Коровин Е.Ю., Качалов А.С., Атамасов В.В., Павлова А.А., Суслев В.И. Электромагнитные свойства композиционного материала на основе полиэтилена и МУНТ, инкапсулированных частицами кобальта..... | 34 |
| Старенченко В.А., Соловьева Ю.В., Вовнова И.Г., Липатникова Я.Д. Многоуровневая модель автоволнового распространения фронта пластической деформации..... | 43 |
| Смирнов И.В., Дитенберг И.А. Влияние концентрации вводимого кислорода на термическую стабильность внутренне-окисленного сплава V–Cr–Zr..... | 51 |
| Багиева Г.З., Исмаилов Р.М. Влияние термообработки на теплопроводность монокристаллов PbTe со сверхстехиометричным свинцом..... | 58 |

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Фисанов В.В., Запасной А.С. Об особенностях поля на ребре в многосекторных структурах с проводящими гранями..... | 64 |
| Журавлев В.А., Сайидкулов Р.Ш., Доценко О.А., Вагнер Д.В. Магнитокристаллическая анизотропия гексаферритов системы $Ba_2Ni_{2-x}Cu_xFe_{12}O_{22}$ | 72 |

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лукин В.П. Особенности параметризации неколомгоровских моделей спектра турбулентности..... | 81 |
| Коновеева Н.Н. Моделирование влияния пространственной неоднородности массива углеродных нанотрубок в полимере на распространение электромагнитного импульса | 89 |
| Еранов И.Д., Юдин Н.Н., Антипов О.Л., Слюнько Е.С., Зиновьев М.М., Кузнецов В.С., Власов Д.В., Кулеш М.М., Подзвальный С.Н., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю. Однорезонаторный параметрический генератор света на базе монокристалла ZGP с прямой накачкой излучением Tm:YLF-лазера..... | 96 |

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Багров А.Р., Башкиров Е.К. Динамика степени совпадения и критерия отрицательности для трехкубитной модели Джайнса – Каммингса | 101 |
| Павленко А.В., Капшай В.Н., Гришечкин Ю.А. Точные решения двумерного уравнения Логунова – Тавхелидзе для потенциалов «дельта-окружность», заданных в релятивистском конфигурационном представлении | 111 |
| Павленко А.В., Гришечкин Ю.А., Капшай В.Н. Точные решения двумерного уравнения Логунова – Тавхелидзе с суперпозицией потенциалов «дельта-окружность», заданных в координатном представлении..... | 120 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Середа М.С., Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Расчет нестационарной скорости горения металлизированного смесового твердого топлива при гармоническом изменении давления | 133 |
| Аганина М.С., Шашкин Г.А. Численное исследование термогравитационной конвекции в замкнутой области с пористым слоем при различных граничных условиях в межфазной зоне | 143 |

Выпуск 11

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н., Михайлов Ю.М. Одновременное дистанционное обнаружение поверхностных следов органофосфатов и нитросоединений..... | 7 |
| Кудряшова О.Б., Грузнов В.М., Кихтенко А.В., Балдин М.Н., Ворожцов А.Б., Михайлов Ю.М. Миграция паров от закопанных в землю боеприпасов..... | 16 |
| Вражнов Д.А., Князькова А.И., Третьяков А.К., Шпилов С.Э., Кистенев Ю.В. Нейросетевая предиктивная модель для количественного анализа данных абсорбционной ИК-спектроскопии атмосферных газов | 27 |
| Дёмин В.В., Юдин Н.Н., Половцев И.Г., Зиновьев М.М., Кузнецов В.С., Кулеш М.М., Слюнько Е.С., Подзвальный С.Н., Баалбаки Х. Алгоритм восстановления голографических изображений дефектов на основе модернизированного быстрого преобразования Фурье..... | 35 |
| Димов М.А., Шпилов С.Э., Цепляев И.С., Зеар А. Коррекция аппаратных амплитудно-фазовых искажений в фазированных антенных решетках..... | 47 |
| Панченко Ю.Н., Алексеев С.В., Андреев М.В., Пучикин А.В., Лубенко Д.М., Бобровников С.М., Михайлов Ю.М. Узкополосный алесандритовый лазер с внешним селективным резонатором | 54 |
| Распопин Г.К., Паулиш А.Г., Михайлов Ю.М., Шкуринов А.П., Кистенев Ю.В. Экспериментальное исследование многопроходной газовой ячейки с изменяемой длиной оптического пути для абсорбционного ТГц-спектрометра | 60 |
| Борисов А.В., Николаев В.В., Кистенев Ю.В. Метод квазинепрерывного контроля частоты акустического резонанса фотоакустического детектора на основе кварцевого резонатора..... | 68 |
| Вражнов Д.А., Князькова А.И., Снегерева М.С., Распопин Г.К., Кистенев Ю.В. Разведочный анализ спектров поляризованного комбинационного рассеяния кристаллов $ZnGeP_2$ методами машинного обучения | 75 |
| Князькова А.И., Снегерева М.С., Вражнов Д.А., Распопин Г.К., Кистенев Ю.В. Регистрация фоновых мод кристалла $ZnGeP_2$ с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния | 85 |
| Снегерева М.С., Князькова А.И., Вражнов Д.А., Распопин Г.К., Кистенев Ю.В. Предсказание частот фоновых мод халькопиритов с использованием графовой нейронной сети | 92 |
| Третьяков А.К., Николаев В.В., Кистенев Ю.В. Определение концентрации летучих молекулярных маркеров эвтрофикации водоемов с использованием терагерцовой спектроскопии и методов машинного обучения..... | 99 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Гаенко О.И., Кудряшова О.Б., Титов С.С., Клименко В.А., Муравлев Е.В., Букреев И.Б., Соколов С.Д. Нейтрализация выбросов вредных газов в помещении с помощью быстро распыленных мелкодисперсных частиц порошков..... | 109 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Григорьев М.В., Егшин В.А., Ахмадиева А.А., Савченко Н.Л., Ермолаев Е.В., Ахметгалиев Р.Ш., Шугаев Ш.Н., Жуков И.А. Влияние процесса формирования анизотропных включений на фазовый состав, структуру и физические свойства корундовой керамики | 118 |
| Ахмадиева А.А., Хрусталёв А.П., Валихов В.Д., Хмельва М.Г. Исследование влияния термообработки на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава МЛ12 с добавкой наночастиц AlN | 128 |
| Марченко Е.С., Гарин А.С., Скрипняк В.А. Влияние поровой структуры на упругие характеристики сплавов NiTi, полученных методом СВС | 136 |
| Сагун А.И., Сенькина Е.И., Лернер М.И. Применение порошковых композиций из нано- и микрочастиц оксида алюминия для аддитивного формования деталей сложной формы экструзионным методом | 144 |
| Матвиенко О.В., Данейко О.И., Хрусталёв А.П., Валихов В.Д., Жуков И.А. Исследование релаксации напряжений вследствие несоответствия коэффициентов теплового расширения матрицы и упрочняющих частиц в композитах на основе алюминия | 151 |
| Ахмадиева А.А., Хрусталёв А.П., Григорьев М.В., Жуков И.А. Влияние состава исходных порошков и температуры спекания на структуру и свойства керамики на основе оксида алюминия | 161 |
| Креницын М.Г., Сенькина Е.И., Сагун А.И., Рюмин Е.Е., Лернер М.И. Влияние наноразмерного оксида алюминия и полимерного связующего на структуру и механические свойства композитов на основе оксида алюминия | 170 |
| Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Глухов И.А., Химич М.А., Уваркин П.В., Толмачев А.И. Температурная зависимость параметров структуры и механических свойств сплава Ti-45Nb в ультрамелкозернистом состоянии | 175 |
| Турова К.А., Байгонакова Г.А., Марченко Е.С. Исследование структуры и механических свойств образцов из никелида титана, полученных методом SLM | 185 |

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Третьяков А.К., Николаев Р.В., Кистенев Ю.В., Шипилов С.Э. Применение модифицированного генетического алгоритма повышенной схожести для аппроксимации поверхности потенциальной энергии молекулы OCS | 192 |
| Бондарчук И.С., Клименко В.А., Ворожцов А.Б. Идентификация размера и концентрации субмикронных частиц на основе модели рэлеевского рассеяния | 196 |

Выпуск 12

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Чернечкин И.А., Милинский А.Ю., Барышников С.В. Тепловые и диэлектрические свойства композитов на основе нитрата рубидия и углеродных нанотрубок | 7 |
| Чмерева Т.М., Кучеренко М.Г., Мушин Ф.Ю. Спазер на основе слоистой цилиндрической нанопроволоки | 15 |
| Бадьин А.В., Кулешов Г.Е., Журавлев В.А., Дорожкин К.В., Томилов И.М., Кателина Д.С., Москаленко В.Д. Композиты на основе термопластичного полиуретана и технического углерода для электромагнитной совместимости в микроволновом и терагерцовом диапазонах | 25 |
| Гриняев К.В., Дитенберг И.А. Влияние комбинированного деформационного воздействия на микроструктуру и микротвердость алюминия | 34 |
| Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Куксгаузен И.В., Куксгаузен Д.А., Петраков В.А. Влияние частиц γ' - и β -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК-ОЦТ-мартенситного превращения в [001]-кристаллах высокоэнтропийного сплава FeNiCoAlTa | 41 |
| Бакина О.В., Федотов Н.Ю., Лернер М.И. Особенности деагломерации электровзрывных двухкомпонентных янус-наночастиц Cu-Fe | 51 |

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лозовой К.А. Энергетика образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом | 58 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Помогаев В.А., Буглак А.А., Кубенко В.Г., Кононов А.И. Фотодинамика переноса протона в молекуле 5,6,7,8-тетрагидробиоптерина | 65 |
| Князькова А.И., Снегерев М.С., Вражнов Д.А., Распопин Г.К., Кистенев Ю.В. Угловая зависимость спектров комбинационного рассеяния в кристалле ZnGeP ₂ : анализ симметрии и определение компонентов рамановских тензоров | 72 |
| Лопес Гуардадо Д.А., Николаев В.В., Зеар А., Кистенев Ю.В. Анализ спектров поглощения газовых проб при помощи фазового подхода | 80 |
| Третьяков А.К., Махманазаров Р.М., Вражнов Д.А., Кистенев Ю.В., Шипилов С.Э. Мультиспектральный синтез квазиизображений ТГц-, ИК- и СВЧ-сенсорике с использованием метода гистограмм ориентированных градиентов | 86 |
| Бурнин М.А., Богданов О.В. Моделирование ОУМ-волн от кольцевой антенной решетки | 95 |

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Бернгардт А.Е., Ерофеев Д.В., Борщ В.Н., Бойков А.В.** Интеграция L2 концентратора в оборудование эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA 104

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- Николаев А.Г., Бугаев А.С., Гридилов В.Д., Гушенец В.И., Окс Е.М., Прокопенко Н.А., Юшков Г.Ю.** Эрозия катодов вакуумной дуги при микросекундном диапазоне длительности импульсов 110
- Белоplotов Д.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Панарин В.А., Сорокин Д.А.** Наблюдение структуры свечения положительных стримеров в углекислом газе 117
- Прокопенко Н.А., Петрикова Е.А., Толкачев О.С., Крыгина О.В., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф.** Покрyтия диоксида титана, полученные вакуумно-дуговым методом в режимах с плазменным ассистированием: синтез, структура, свойства 125

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Жуков И.А., Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., Ермолаев Е.В., Ахметгалiev P.Ш., Егoшин В.А., Шугаев П.Н.** Численное моделирование отвода летучих компонентов при обжиге металлокерамических корпусов для интегральных микросхем 133
- Шнейдер А.А., Шеремет М.А.** Математическое моделирование вынужденной конвекции в осесимметричном канале при локальном нагреве стенки 143
- Архипов В.А., Басалаев С.А., Бондарчук И.С., Золоторёв Н.Н., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г.** Экспериментальное исследование плотности орошения при сбросе жидкого хладагента с борта БПЛА 151
- Зиятдинов М.Х., Жуков А.С., Куликов А.Е., Байгонакова Г.А.** Синтез горением композиционных ферросплавов в режиме термического сопряжения 158

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Станкевич С.В., Эмурлаев К.И., Котов Д.И., Буров В.Г., Батаев И.А., Батаева З.Б.** Механизм изнашивания стали Гадфильда при нагружении по схеме качения индентора с проскальзыванием 167
- Пухова Е.А., Дробяз Е.А., Батаев В.А.** Стойкость к окислению поверхностных слоев на стали 12X18H9T, легированных бором и цирконием 172

ПЕРСОНАЛИЯ

- Майер Г.В., Некрылов С.А., Степнов А.О.** Академик Владимир Евсеевич Зуев и развитие российских классических университетов в советский и постсоветский период 176

УКАЗАТЕЛИ

- Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика» за 2025 г.** 184
- Именной указатель журнала «Известия вузов. Физика» за 2025 г.** 193

**Именной указатель журнала
«Известия вузов. Физика»
за 2025 г.***

А

Абдулгабова С.К., 3
Авакянц Л.П., 10
Авдюшев В.А., 3
Авербух Б.Б., 2
Авербух И.Б., 2
Агеев Б.Г., 1
Адуев Б.П., 5
Акименко Н.Ю., 3
Аксенова Ю.В., 2
Акулова Д.В., 1
Александров В.С., 5
Алексеев С.В., 11
Аллахвердиев К.Р., 3
Алмаев Д.А., 4, 5
Аман Э.Г., 8
Андреев М.В., 11
Андрюшина И.Н., 6
Антипов А.А., 5
Антипов О.Л., 1, 5, 10
Арефьев К.П., 1
Архипов В.А., 12
Аскеров К.А., 3
Астанина М.С., 10
Астафурова Е.Г., 1, 6
Атамасов В.В., 10
Атутов Е.Б., 5
Ахмадиева А.А., 11*
Ахметгалиев Р.Ш., 11, 12
Ахметов А., 6
Ашхотов О.Г., 8
Ашхотова И.Б., 8

Б

Баалбаки Х., 1, 11
Багиева Г.З., 10
Багров А.Р., 10
Бадьин А.В., 12
Базыль О.К., 2, 4, 8
Байгонакова Г.А., 11, 12
Бакина О.В., 12
Балдин М.Н., 11
Бальва Я.Ф., 7, 9
Барышников С.В., 3, 7, 12
Басалаев С.А., 12
Баскакова К.И., 3
Басс М.С., 4
Батаев В.А., 12
Батаев И.А., 12
Батаева З.Б., 12
Батрагин А.В., 1
Батухтин С.Г., 4

Башкиров Е.К., 10
Безлепкина Н.П., 4, 8
Белоплов Д.В., 5, 12
Беляев Б.А., 1, 7, 9
Бернгардт А.Е., 12
Блошкин А.А., 6
Бобровников С.М., 11*
Бобылёв В.А., 6
Богданов О.В., 12
Богушевич А.Я., 6
Боева Е.А., 8
Бойков А.В., 12
Бондаренко С.Л., 1
Бондарчук И.С., 11, 12
Бордулев Ю.С., 1
Борзенко Е.И., 6
Борисов А.В., 11
Борщ В.Н., 12
Бочарникова Е.Н., 2, 5, 8
Бреев А.И., 4
Брудный В.Н., 6
Бугаев А.С., 12
Буглак А.А., 12
Букреев И.Б., 11
Буркин В.В., 4, 5
Бурлаков И.Е., 7
Бурмистров Е.Р., 10
Бурнин М.А., 12
Буров В.Г., 12

В

Вагнер Д.В., 3, 5, 10
Валиев Р.Р., 3, 4
Валиулина Л.И., 3, 4
Валихов В.Д., 11*
Васильев В.В., 2
Велиев Н.А., 3
Вербенко И.А., 6
Вишняков А.В., 2
Власов Д.В., 10
Вовнова И.Г., 8, 10
Вовченко Е.Д., 5
Войцеховский А.В., 3, 10
Вологжин М.А., 4
Воробьёв М.С., 1
Ворожцов А.Б., 11*
Вражнов Д.А., 11*
Вражнов Д.А., 12*

Г

Габдрахманов А.Ш., 1, 5
Гаенко О.И., 11
Гайдук А.Е., 6, 7
Галкин К.Н., 3
Галкин Н.Г., 3

Гарбузов Д.Н., 6
Гарин А.С., 11
Гасымов А.И., 9
Герасимова М.П., 7, 8
Гладков С.О., 2, 4, 8
Глазунова Е.В., 6
Глухов И.А., 11
Говорун И.В., 9
Голубков П.Е., 5
Гольдберг А.А., 7
Горлов Е.В., 11
Горн Д.И., 10
Грабко Г.И., 4, 7
Грибенюков А.И., 1
Григорьев М.В., 11*
Гридилев В.Д., 7, 12
Гриняев К.В., 9, 12
Гришечкин Ю.А., 9, 10*
Гришков А.А., 1
Громов В.Е., 2
Грузнов В.М., 11
Грунская Л.В., 2
Гуртова Д.Ю., 6
Гурулев А.В., 9
Гушенец В.И., 12

Д

Давыдов В.В., 7
Давыдов Р.В., 7
Данейко О.И., 9, 11
Двужилов И.С., 1
Двужилова Ю.В., 1
Дектярев С.В., 9
Дёмин В.В., 11
Джафаров Р.Г., 9
Димов М.А., 11
Дин Ю., 8
Дирко В.В., 3
Дитенберг И.А., 9, 10, 12
Долбин И.В., 4
Дорожкин К.В., 12
Дорошкевич С.Ю., 1
Доценко О.А., 3, 5, 10
Дробяз Е.А., 12
Дудкин В.И., 7
Дьячковский А.С., 4, 5

Е

Егоров И.С., 8
Егошин В.А., 11, 12
Еранов И.Д., 10
Ермолаев Е.В., 11
Ермолаев Е.В., 12
Ерофеев Д.В., 12
Ерошенко А.Ю., 11

Ершков М.Н., 5
Ершов А.А., 2
Ефремов М.А., 6
Ефтифеева А.С., 8

Ж

Жарков В.И., 11
Жмудь В.А., 9
Жуков А.С., 12
Жуков И.А., 11*, 12
Журавлев В.А., 12
Журавлев В.А., 3, 10

З

Заворотный А.А., 2
Загуляев Д.В., 2
Запасной А.С., 10
Зарипов Р.Г., 4, 6
Звегинцев В.И., 4
Зеар А., 11, 12
Зеленова М.А., 6
Зиятдинов М.Х., 12
Зиновьев М.М., 1, 5, 10,
11
Зо Аунг, 4
Золоторёв Н.Н., 12

И

Иванов Ю.Ф., 2*, 12
Иванова А.И., 9
Ивченко В.А., 7
Исакевич В.В., 2
Исакевич Д.В., 2
Исмаилов Р.М., 10
Ищенко А.Н., 4, 5

К

Кальсин А.Ю., 1, 5, 10
Канаев А.Ю., 5
Капшай В.Н., 9, 10*
Карева К.В., 3
Картавцов Р.А., 1
Касымов Д.П., 3
Кателина Д.С., 12
Качалов А.С., 10
Каширский Д.Е., 10
Кеда И.С., 3, 5
Киреева И.В., 1, 7, 9, 12
Кириенко В.В., 6
Киселев А.В., 5
Кистенев Ю.В., 6, 7, 8,
11*, 12*
Кихтенко А.В., 11
Клименко В.А., 11*
Князькова А.И., 11*, 12

* Более одной статьи в номере.

Ковадло П.Г., 5
 Коваль Н.Н., 1, 12
 Кожевников В.Ю., 10
 Козловский К.И., 5
 Козырев А.В., 7, 10
 Коляда Д.В., 7
 Комков О.С., 6, 7
 Конобеева Н.Н., 10
 Кононов А.И., 12
 Константинов В.О., 9
 Копьев В.В., 4
 Коренблит С.Э., 8
 Корнева О.С., 9
 Коровин Е.Ю., 4, 5, 10
 Корольков В.А., 6
 Котов Д.И., 12
 Коханенко А.П., 3
 Кравцова Н.С., 7, 8
 Крайнов А.Ю., 9, 10, 12
 Краснобаева Л.А., 4
 Крёков С.Д., 7
 Криницын М.Г., 11
 Крыгина О.В., 12
 Крючков А.В., 7, 8
 Кубенко В.Г., 12
 Кудрявцев В.А., 4, 5
 Кудряшова О.Б., 11*
 Кузнецов В.С., 1, 5, 10, 11
 Кукенов О.И., 3, 4
 Куксгаузен Д.А., 1, 9, 12
 Куксгаузен И.В., 1, 9, 12
 Кулагин А.Е., 3
 Кулеш М.М., 1, 5, 10, 11
 Кулешов Г.Е., 12
 Куликов А.Е., 12
 Курлевская И.Д., 8
 Кучеренко М.Г., 12

Л

Лаптев Р.С., 1
 Левин Ю.К., 2, 5, 7
 Лексиков А.А., 7
 Лексиков А.А., 9
 Лернер М.И., 11*, 12
 Липатникова Я.Д., 10
 Лисков И.Ю., 5
 Литовченко И.Ю., 2
 Лихоманова С.В., 8
 Лобода Е.Л., 3
 Лозовой К.А., 3, 12
 Ломыгин А.Д., 1
 Лопес Гуардадо Д.А., 12
 Лубенко Д.М., 11
 Лузянин С.Е., 2
 Лукашов О.Ю., 9
 Лукин В.П., 10
 Лучин А.В., 6
 Лымарь Д.В., 6
 Лысенко А.Б., 1, 5, 10

М

Магкоев Т.Т., 3, 8
 Мазилев Д.А., 4
 Майер Г.В., 2, 4, 8, 12
 Макарова А.С., 5
 Мамедов И.Х., 3
 Мамонтов Г.В., 1
 Маркова А.А., 7, 8
 Марченко Е.С., 11*
 Матвиенко О.В., 9, 11, 12
 Матыскин К.Е., 5
 Махманазаров Р.М., 12
 Машанов В.И., 6, 7
 Медведева Т.И., 3
 Мельников А.Ю., 4
 Мерзлякин Б.С., 3
 Миллинский А.Ю., 3, 7, 12
 Миненко С.С., 2
 Минин Р.В., 3
 Митрофанов А.Ю., 5
 Михайлов Ю.М., 11*
 Моисеева К.М., 9, 12
 Москаленко А.Д., 8
 Москаленко В.Д., 12
 Муравлев Е.В., 11
 Муратов Т.Т., 6
 Мурашко С.Н., 11
 Мусаев А.А., 3
 Мусин А.И., 7
 Мушин Ф.Ю., 12

Н

Нагибин Н.С., 2
 Насибуллин Р.Т., 3, 4
 Некрылов С.А., 12
 Никифоров А.И., 6
 Николаев А.Г., 9, 12
 Николаев В.В., 11*, 12
 Николаев Р.В., 11
 Никоненко Е.Л., 8
 Нифонтов А.С., 1
 Новиков П.Л., 7
 Носанов В.С., 2
 Нурмухаметов Д.Р., 5

О

Оберемок А.А., 9
 Оболдуев Д.А., 5
 Окс Е.М., 12
 Осипов Д.А., 9

П

Павленко А.В., 9, 10*
 Павлова А.А., 4, 5, 10
 Павский К.В., 7
 Панарин В.А., 12
 Панченко Е.Ю., 8
 Панченко Ю.Н., 11
 Паулиш А.Г., 11
 Пашаев А.М., 3
 Перевозников Е.Н., 3

Перфильева К.Г., 12
 Петраков В.А., 12
 Петрикова Е.А., 12
 Печерская Е.А., 5
 Пинаев В.А., 9
 Плотников Н.В., 3
 Победенная З.В., 1, 7
 Подзыватьов С.Н., 1, 5, 10, 11
 Половцев И.Г., 11
 Поляков А.В., 3
 Поминов К.И., 7
 Помогаев В.А., 12
 Понизовная Д.А., 1
 Попова Н.А., 8
 Порязов В.А., 10
 Проводин Д.С., 7
 Прокопенко Н.А., 12*
 Прохоров Е.С., 1
 Путилов А.Г., 5
 Пухова Е.А., 12
 Пучикин А.В., 11

Р

Распопин Г.К., 11*, 12
 Резниченко Л.А., 6
 Романовский О.А., 8
 Рюмин Е.Е., 11

С

Сабинина И.В., 2
 Савельева А.С., 1
 Савин Д.Р., 9
 Савченко Н.Л., 11
 Савчук Д.А., 1
 Сагун А.И., 11*
 Садовников С.А., 7, 8
 Сайидкулов Р.Ш., 10
 Самарин М.А., 6
 Саммель А.Ю., 4, 5
 Самойлов В.Н., 7
 Сапаев Х.Х., 4
 Сапожникова В.А., 1
 Саркисов С.Ю., 6
 Семёнов А.Д., 5
 Семенюк Н.С., 7
 Семин А.П., 2
 Сенькина Е.И., 11*
 Серебренников М.А., 8
 Серебрякова А.А., 2
 Середа М.С., 10
 Сержантов А.М., 7, 9
 Сидоров Г.Ю., 2
 Синюков С.А., 9
 Скакун В.С., 12
 Скворцов И.В., 6, 7
 Скосырский А.Б., 4, 5
 Скрипник А.П., 5
 Скрипняк В.А., 11
 Слюнько Е.С., 1, 5, 10, 11
 Сметанин С.Н., 5
 Смирнов И.В., 10

Смолин И.Ю., 6
 Снегирев М.С., 11*, 12
 Соколов С.Д., 11
 Соколова И.В., 5
 Соловьева Ю.В., 8*, 10
 Соломонов В.И., 5
 Солохин С.А., 5
 Сорокин Д.А., 5, 12
 Соснин Э.А., 5, 12
 Спирина А.В., 5
 Станкевич С.В., 12
 Старенченко В.А., 8*, 10
 Степанов Е.Ю., 4, 5
 Степанов Н.П., 7
 Степнов А.О., 12
 Стукова Е.В., 3, 7
 Стучебров С.Г., 1
 Стучинский В.А., 2
 Суслиев В.И., 4, 5, 10

Т

Татур В.В., 8
 Тимофеев В.А., 6, 7
 Титов Е.А., 9
 Титов С.С., 11
 Тихомиров А.А., 8
 Толкачев О.С., 12
 Толмачев А.И., 11
 Томилов И.М., 12
 Торба М.С., 1
 Точиев Дж.С., 4
 Третьяков А.К., 6, 11*, 12
 Трофимов Е.А., 5
 Тугульдунова В.П., 3
 Турова К.А., 11
 Тюрнев В.В., 1

У

Уваркин П.В., 11
 Улмасов А.Б., 9
 Устинова И.Г., 1
 Уткин Д.Е., 6, 7

Ф

Федорова А.В., 7, 9
 Федотов Н.Ю., 12
 Филатов В.В., 8
 Филиппов А.И., 6
 Филиппов В.В., 2
 Фирсов Д.Д., 6, 7
 Фисанов В.В., 10
 Фомин Д.В., 3
 Фролов Д.О., 2
 Фролова В.П., 9

Х

Хабибуллин М.В., 5
 Хахулин С.А., 6, 7
 Химич М.А., 11
 Хмельова М.Г., 11
 Хрусталёв А.П., 11*

| | | | |
|-----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Ц | Чумляков Ю.И. , 1, 7, 8, 9, 12 | Шипилов С.Э. , 11*, 12 | Э |
| Цепляев И.С., 11 | Чупашев А.В. , 4, 5 | Шиховцев А.Ю., 5 | Эмурлаев К.И., 12 |
| Цуй Цзян, 1 | | Шкода О.А., 8 | Эфендиева И.К., 3 |
| Цымбалов А.В., 4 | Ш | Шкурина Е.Д., 5 | |
| Цынк П.Н., 7 | Шабанов Д.А., 1 | Шкуринов А.П., 11 | Ю |
| Ч | Шаповалов А.В., 3, 4, 9 | Шляров В.В., 2 | Юдин Н.Н., 1, 5, 10, 11 |
| Чайковская О.Н., 2, 4, 5, 8 | Шаркеев Ю.П., 11 | Шнейдер А.А., 12 | Юшков Г.Ю., 7, 12 |
| Чайковский С.А., 5 | Шатохин В.В., 3 | Шолыгин И.О., 3 | |
| Чалый Н.А., 4 | Шашкин Г.А., 10 | Шостак Н.А., 6 | Я |
| Чапайкин А.С., 2 | Шелехов А.П., 6 | Шугаепов Ш.Н., 11, 12 | Яковлев С.В., 7, 8 |
| Черепанов В.Н., 3, 4 | Шепелев А.Е., 5 | Шумилов Т.Ю., 9 | Якушов Д.В., 5 |
| Черепанов Д.Н., 8 | Шеремет М.А., 1, 12 | | Янушоните Э.И., 8 |
| Чернев И.М., 3 | Шеховцов В.В., 9 | Щ | |
| Чернечкин И.А., 12 | Шиканов А.Е., 5 | Щукин В.Г., 9 | |
| Чмерева Т.М., 12 | Шилкина Л.А., 6 | | |

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 12

Адрес редакции и издателя:
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
Томский государственный университет,
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

Подписано к печати 17.12.2025. Выпуск в свет 19.12.2025. Заказ № 6622.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 22.78. Уч.-изд. л. 25.52. Тираж 44 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: rio.tsu@mail.ru

