

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

12·2023

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Декабрь, 2023

№ 12 (793)

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



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
Багров В.Г., проф. (зам. гл. редактора), 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., чл.-корр. 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
Казинский П.О., 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
Bagrov V.G. (Deputy 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., Corr. Member 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
Kazinski P.O., 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 МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Карева К.В., Сураев А.С., Червинская А.С., Доценко О.А., Кушнарев Б.О., Минин Р.В., Журавлев В.А., Вагнер Д.В. Структурные характеристики и магнитные свойства синтезированных керамическим методом ферромагнетиков $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$5

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Яковлева Л.П., Победенная З.В., Куксгаузен И.В., Куксгаузен Д.А. Высокотемпературная сверхэластичность в $[123]$ -монокристаллах сплава $FeMnAlNiC$, состаренных в высокотемпературной фазе и мартенсите.....12
- Барышников С.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В., Зеева А.А. Стабилизация сегнетоэлектрической фазы нитрата калия в композите $[KNO_3]_{1-x}/[Ba(NO_3)_2]_x$22
- Беляев Б.А., Ходенков С.А., Сержантов А.М., Говорун И.В. Исследование полосно-пропускающих фильтров на многомодовых микрополосковых резонаторах с проводником в форме шпильки.....29
- Мишин И.П., Найденкин Е.В., Александровский Э.К., Манишева А.И. Влияние структурно-фазовых превращений на механические свойства и разрушение β -титанового сплава в процессе комбинированной прокатки и старения.....40
- Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Вовнова И.Г., Старенченко В.А., Белов Н.Н., Черепанов Д.Н., Валуйская Л.А. Макролокализация пластической деформации при одноосном сжатии в модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела.....48
- Гусева А.В., Плотников В.А., Грязнов А.С. Исследование реактивных напряжений в сплавах на основе никелида титана.....55
- Богданов А.А., Панин С.В., Еремин А.В., Буслевич Д.Г. Влияние циклической ползучести на усталостное поведение дисперснонаполненных термопластичных композитов.....62
- Панченко М.Ю., Нифонтов А.С., Астафуров С.В., Реунова К.А., Загibalова Е.А., Колубаев Е.А., Астафурова Е.Г. Микроструктура и фазовый состав сплава $TiNi$, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства.....69
- Просолов К.А., Ластовка В.В., Толмачев А.И., Химич М.А., Сулиз К.В., Казанцев С.О., Ложкомоев А.С., Шаркеев Ю.П. Структурные особенности и закономерности формирования мишени для ВЧ-магнетронного распыления из биметаллических частиц $Cu-W$79
- Севостьянова И.Н., Саблина Т.Ю., Горбатенко В.В. Исследование деформационного поведения композитного материала на основе керамического каркаса $ZrO_2(Y_2O_3)$ с биополимерным наполнителем при испытаниях на осевое сжатие.....86
- Гаенко О.И., Муравлев Е.В., Титов С.С., Клименко В.А., Кудряшова О.Б., Ворожцов А.Б., Марченко Е.С., Кокорев О.В., Соколов С.Д., Нефедов Р.А. Выявление влияния состава йодсодержащих нанотермитных систем Me_xO_y/Al ($Me = Cu, Fe, Mo$) на нейтрализацию бактериальных спор.....97
- Грабченко М.В., Харламова Т.С., Львова Е.С., Бугрова Т.А., Васильченко Д.Б., Водянкина О.В. Ag и $Pt-Ag$ катализаторы на основе $SeMnO_x$ для процесса горения сажи.....105

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Вишняков А.В., Стучинский В.А., Васильев В.В. Эвристическая формула для оценки эффективной длины диффузии фотогенерированных носителей заряда в ИК-фотоприемных матрицах.....117

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П. Спектры фото- и электролюминесценции гетероструктур со множественными квантовыми ямами $In_xGa_{1-x}N/GaN$126
- Татур В.В., Тихомиров А.А. Регистрация паров бензола и толуола анализатором ртути на основе поперечного эффекта Зеемана.....137

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Астапенко В.А., Бергалиев Т.К., Сахо С.В. Возбуждение квантового осциллятора короткими электромагнитными импульсами: зависимость от абсолютной фазы.....143
- Марков Ю.А., Маркова М.А., Марков Н.Ю. Гамильтонов формализм для коллективных бозонных волн в кварк-глюонной плазме: рассеяние плазмонов на жесткой цветной частице.....151

УКАЗАТЕЛИ

- Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика» за 2023 г.166
- Именной указатель журнала «Известия вузов. Физика» за 2023 г.177

CONTENTS

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Kareva K.V., Suraev A.S., Chervinskaya A.S., Dotsenko O.A., Kushnarev B.O., Minin R.V., Zhuravlev V.A., Wagner D.V.** Structural characteristics and magnetic properties of $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrimagnets synthesized by ceramic method..... 5

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Chumlyakov Y.I., Kireeva I.V., Yakovleva L.P., Pobedennaya Z.V., Kuksgauzen I.V., Kuksgauzen D.A.** High-temperature superelasticity in $[\bar{1}23]$ -oriented single crystals of the femmialc alloy aged in the high temperature phase and martensite 12
- Baryshnikov S.V., Milinskiy A.Yu., Stukova E.V., Zeeva A.A.** Stabilization of the ferroelectric phase of potassium nitrate in the composite $[\text{KNO}_3]_{1-x}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_x$ 22
- Belyaev B.A., Khodenkov S.A., Serzhantov A.M., Govorun I.V.** The investigation of bandpass filters based on multimode microstrip resonators with a pin-shaped conductor 29
- Mishin I.P., Naydenkin E.V., Alexandrovsky E.K., Manisheva A.I.** Influence of structural phase transformations on the mechanical properties and fracture of β titanium alloy in the process of combined rolling and aging 40
- Lipatnikova Ya.D., Solov'eva Yu.V., Vovnova I.G., Starenchenko V.A., Belov N.N., Cherepanov D.N., Valuiskaya L.A.** Macroscopic strain localization under uniaxial compression in the synthesis model of dislocation kinetics and mechanics of deformable solid body 48
- Guseva A.V., Plotnikov V.A., Gryaznov A.S.** Investigation of reactive stresses in titanium nickelide-based alloys 55
- Bogdanov A.A., Panin S.V., Eremin A.V., Buslovich D.G.** Influence of cyclic creep on the fatigue behavior of particulate polymer composites 62
- Panchenko M.Yu., Nifontov A.S., Astafurov S.V., Reunova K.A., Zagibalova E.A., Kolubaev E.A., Astafurova E.G.** The microstructure and phase composition of a TiNi alloy produced by the electron-beam additive manufacturing 69
- Prosolov K.A., Lastovka V.V., Tolmachev A.I., Khimich M.A., Suliz K.V., Kazantsev S.O., Lozhkomoev A.S., Sharkeev Yu.P.** Structural features and regularities of the formation of a target for RF magnetron sputtering from W–Cu bimetallic particles 79
- Sevostyanova I.N., Sablina T.Yu., Gorbatenko V.V.** Investigation of the deformation behavior of a composite material based on a $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ ceramic framework with a biopolymer filler during the axial compression tests using the digital image correlation 86
- Gaenko O.I., Muravlev E.V., Titov S.S., Klimenko V.A., Kudryashova O.B., Vorozhtsov A.B., Marchenko E.S., Kokorev O.V., Sokolov S.D., Nefedov R.A.** Determination of the influence of the composition of iodine-containing nanothermite systems $\text{Me}_x\text{O}_y/\text{Al}$ ($\text{Me} = \text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mo}$) on the neutralisation of bacterial spores 97
- Grabchenko M.V., Kharlamova T.S., L'vova E.S., Bugrova T.A., Vasilchenko D.B., Vodyankina O.V.** Ag and Pt–Ag catalysts based on CeMnO_x for soot combustion 105

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Vishnyakov A.V., Stuchinsky V.A., Vasil'ev V.V.** Heuristic formula for evaluating the effective diffusion length of photogenerated charge carriers in IR focal plane arrays 117

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Burmistrov E.R., Avakyants L.P.** Photo- and electroluminescence spectra of heterostructures with $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ multiple quantum wells 126
- Tatur V.V., Tikhomirov A.A.** Registration of benzene and toluene vapors with a mercury analyzer based on the transverse Zeeman effect 137

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Astapenko V.A., Bergaliev T.K., Sakhno S.V.** Excitation of a quantum oscillator by short electromagnetic pulses: dependence on the absolute phase 143
- Markov Yu.A., Markova M.A., Markov N.Yu.** Hamiltonian formalism for the collective bosonic waves in a quark-gluon plasma 151

POINTERS

- Index** of articles and brief communications published in the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2023 166
- Name** index of the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2023 177

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 53.083.2

DOI: 10.17223/00213411/66/12/1

Структурные характеристики и магнитные свойства синтезированных керамическим методом ферритмагнетиков $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ *К.В. Карева¹, А.С. Сураев¹, А.С. Червинская¹, О.А. Доценко^{1,2},
Б.О. Кушнарев¹, Р.В. Минин³, В.А. Журавлев¹, Д.В. Вагнер¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*³ *Томский научный центр СО РАН, г. Томск, Россия*

Синтезирована система ферритов $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) по короткой керамической технологии. Доказано, что гомогенизация шихты с помощью этилового спирта при перемешивании и высокое давление при изготовлении пресс-заготовок из шихты позволяют получать ферриты без предварительного обжига. Рентгенофазовый анализ ферритов показал отсутствие примесных фаз для всех синтезированных образцов. Проведено измерение петли магнитного гистерезиса в импульсных магнитных полях величиной до 6.5 кЭ. Исследование магнитных свойств показало, что добавление ионов цинка позволяет увеличивать значение удельной намагниченности насыщения. Температуры Кюри синтезированных материалов близки к известным из литературы.

Ключевые слова: никель-цинковые ферриты, синтез, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, температура Кюри, импульсный магнитометр, керамическая технология.

Введение

Потребность в отечественных электронных компонентах для магнитных цепей требует поиска материалов для их изготовления. Одними из востребованных материалов в современной электронике являются магнитомягкие ферритмагнетики. Данные материалы имеют высокие значения намагниченности насыщения и начальной магнитной проницаемости, малые потери при перемагничивании, низкую электропроводность, сохраняют свои магнитные свойства при высоких температурах (300–670 °С). Вследствие этого магнитомягкие ферриты находят применения при изготовлении планарных катушек индуктивности [1], ферритовых фильтров [2], сердечников трансформаторов [3, 4], фазовращателей и циркуляторов в сверхвысокочастотных волноводных трактах [5], радиопоглощающих материалах [6].

Наиболее популярные магнитные материалы в электронике – ферриты со структурой шпинели, описываются химической формулой $MeFe_2O_4$, где Me – двухвалентный ион металла (Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mg, Cd). Наибольший интерес представляют материалы с комбинацией ионов – смешанные ферриты. В этом случае в соединениях может использоваться и комбинация ионов, средняя валентность которых будет также равна двум, например, одновалентный ион лития Li^{1+} и трехвалентный ион железа Fe^{3+} [7].

Свойства ферритов зависят от способа синтеза. К наиболее распространенным методам синтеза ферритов относятся стандартная керамическая технология, метод химического соосаждения, золь-гель-горение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), радиационно-термическое спекание, распылительный пиролиз и его разновидности. Метод химического осаждения, золь-гель-горение и распылительный пиролиз активно используются для изготовления наноразмерных порошков ферритов. Радиационно-термическое спекание позволяет получить ферритовую керамику с высокой плотностью. Основными недостатками данных методов является низкая производительность и сложность протекания химической реакции, от которой зависит фазовый состав порошков ферритов. СВС редко используют как самостоятельный метод, так как реак-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер гранта 22-79-00074, <https://rscf.ru/project/22-79-00074/> (дата обращения: 31 октября 2023 г.), частично в рамках выполнения государственного задания при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта FWRF-2021-0003) и при поддержке Программы развития ТГУ («Приоритет-2030»).

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.371:548.55

DOI: 10.17223/00213411/66/12/2

Высокотемпературная сверхэластичность в $[\bar{1}23]$ -монокристаллах сплава FeMnAlNiC, состаренных в высокотемпературной фазе и мартенсите*Ю.И. Чумляков¹, И.В. Киреева¹, Л.П. Яковлева¹,
З.В. Победенная¹, И.В. Куксгаузен¹, Д.А. Куксгаузен¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

В $[\bar{1}23]$ -монокристаллах сплава FeMnAlNiC, испытывающих ОЦК–ГЦК-мартенситное превращение, высокотемпературная сверхэластичность (СЭ) наблюдается при сжатии в закаленном состоянии и после старения при 473 К в течение 3 ч в высокотемпературной фазе и мартенсите. СЭ имеет место в широком температурном интервале от 203 до 473 К. Максимальная величина СЭ $\epsilon_{СЭ}$ в закаленном состоянии достигает 4.8%, а в кристаллах, состаренных в высокотемпературной фазе и в мартенсите, ее величина равна 4%. После старения в мартенсите наблюдаются двухстадийные кривые СЭ.

Ключевые слова: монокристаллы FeMnAlNiC, ОЦК–ГЦК-мартенситное превращение, высокотемпературная сверхэластичность, сжатие.

Введение

Сплавы FeMnAlNiX (X = C, Ti, Cr) представляют собой новый класс материалов с высокотемпературной сверхэластичностью (СЭ) при развитии ОЦК–ГЦК (ОЦК – объемноцентрированная кубическая решетка, ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка)-мартенситного превращения (МП) под нагрузкой, которые могут найти применение в авиации и космонавтике [1–12]. Высокий уровень напряжений для начала МП $\sigma_{кр}$ и создание условий для высокотемпературной СЭ достигаются в этих сплавах за счет выделения наноразмерных частиц β -фазы [1]. Сплавы этой системы FeMnAlNi обладают малыми значениями $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$, которые равны 0.3 МПа/К, а легирование Cr концентрацией $C_{Cr} \leq 4$ ат.% приводит к дальнейшему уменьшению α вплоть до $\alpha = 0$. При $C_{Cr} = 7.5$ ат.% α изменяет знак и становится отрицательной величиной [12].

Поликристаллы этих сплавов хрупко разрушаются по границам зерен [1]. Олиго- и монокристаллы характеризуются высокими значениями обратимой деформации до 8% и аномально большим температурным интервалом СЭ от 10 до 473 К [1–7, 12]. Наибольший интерес для исследования СЭ представляет ориентация [001], в которой теоретические значения обратимой деформации $\epsilon_{СЭ} = 10\%$, а экспериментальные значения $\epsilon_{СЭ} = 7.2\%$ [3, 7]. В настоящее время работ по исследованию ориентационной зависимости напряжений для начала МП под нагрузкой $\sigma_{кр}$ и $\epsilon_{СЭ}$ проводится недостаточно. Поэтому в настоящей работе ставилась задача исследовать влияние наноразмерных частиц β -фазы на $\sigma_{кр}$ и $\epsilon_{СЭ}$ при сжатии в монокристаллах сплава FeMnAlNiC, ориентированных вдоль $[\bar{1}23]$ -направления. Выбор ориентации $[\bar{1}23]$ обусловлен, во-первых, большой величиной теоретической деформации решетки ϵ_0 , равной 9% при сжатии [3, 5, 7]. Во-вторых, в этой ориентации при сжатии деформация превращения, связанная с образованием сдвойникового мартенсита, $\epsilon_{СVP} = 6\%$, а деформация, связанная с раздвойникованием СVP-структуры ГЦК-мартенсита $\epsilon_{detw} = 3\%$ и $\epsilon_0 = \epsilon_{СVP} + \epsilon_{detw} = 9\%$.

Взаимодействие мартенсита с дисперсными частицами зависит от размера частиц, характера сопряжения решеток частицы и высокотемпературной фазы (когерентного, полуккогерентного и некогерентного), тонкой двойниковой структуры мартенсита и возможности, в зависимости от ориентации кристалла и способа деформации (растяжения или сжатия), сохранять двойники в мартенсите под нагрузкой или изменять свою структуру за счет раздвойникового [8–10]. Наибольший интерес для исследования влияния частиц на СЭ представляют наноразмерные частицы [8, 9].

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-19-00017.

Стабилизация сегнетоэлектрической фазы нитрата калия в композите $[\text{KNO}_3]_{1-x}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_x$

С.В. Барышников¹, А.Ю. Милинский¹, Е.В. Стукова², А.А. Зеева²

¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Проведены исследования температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и коэффициента третьей гармоники сегнетоэлектрического композита $[\text{KNO}_3]_{1-x}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_x$ (с x от 0.02 до 0.20 объемных долей) в сравнении с чистым KNO_3 . Показано, что добавление $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ приводит к расширению сегнетоэлектрической фазы нитрата калия при охлаждении до комнатной температуры. Сегнетоэлектрическая фаза нитрата калия в $[\text{KNO}_3]_{0.98}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_{0.02}$ может возникать не только при охлаждении, но и при нагревании.

Ключевые слова: композит, нитрат калия, нитрат бария, диэлектрическая проницаемость, коэффициент третьей гармоники, сегнетоэлектрическая фаза, фазовый переход.

Введение

В настоящее время в связи с непрерывно возрастающими требованиями к элементам микро- и нанoeлектроники становятся актуальными проблемы получения материалов, обладающих уникальными физическими свойствами, такими как гигантская диэлектрическая проницаемость, большая нелинейность и т.д. Неоднородные сегнетоэлектрические микро- и наноструктуры, состоящие из различных по своим свойствам компонентов или фаз, становятся более перспективными для таких применений. Сегнетоэлектрики благодаря высоким значениям диэлектрической проницаемости и способности изменять направление спонтанной поляризации активно исследуются как материалы для создания энергонезависимой памяти (FRAM – Ferroelectric Random Access Memory) [1]. Наличие у нитрата калия KNO_3 прямоугольной петли гистерезиса и относительно высокой спонтанной поляризации дает возможность использовать этот материал для создания элементов энергонезависимой памяти. Однако сегнетоэлектрическая фаза в нитрате калия возникает только при охлаждении в температурном интервале 397–373 К и является метастабильной. Поиск условий, при которых сегнетоэлектрическая фаза нитрата калия остается стабильной вплоть до комнатной температуры и ниже, является актуальной задачей.

В ряде работ сообщалось о попытках расширения температурной области существования сегнетоэлектрической фазы путем создания композитов и твердых растворов на основе нитрата калия [2–5]. Так, для сегнетоэлектрических композитов $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$ [2] и $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{KNbO}_3)_x$ [3] было обнаружено расширение температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы нитрата калия до интервала 330–375 К, которое обусловлено диполь-дипольным взаимодействием между частицами компонент композита. В [4] были исследованы композиты $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{RbNO}_3)_x$. Установлено, что увеличение содержания RbNO_3 также приводит к расширению температурного интервала существования сегнетоэлектрической фазы, но при этом возникает дополнительный фазовый переход, который объясняется возникновением в композите доли твердого раствора $\text{K}_{(1-x)}\text{Rb}_x\text{NO}_3$. Сообщалось [5] о расширении области существования сегнетоэлектрической фазы KNO_3 вплоть до комнатной температуры при легировании его ионами натрия Na^+ .

В данной работе приводятся результаты исследований температурных зависимостей диэлектрической проницаемости $\epsilon'(T)$ и коэффициента третьей гармоники $\gamma_{3\omega}(T)$ для композита $[\text{KNO}_3]_{1-x}/[\text{Ba}(\text{NO}_3)_2]_x$ (с x от 0.02 до 0.20 объемных долей) в сравнении с чистым KNO_3 .

1. Образцы и методика эксперимента

При комнатной температуре KNO_3 имеет ромбическую структуру ($a = 5.41 \text{ \AA}$, $b = 6.19 \text{ \AA}$, $c = 9.15 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) с пространственной группой $Rm\bar{c}n$ [6]. K^{1+} связан в 9-координатной геометрии с девятью атомами O^{2-} . Расстояния связи К–О варьируются в пределах 2.77–2.89 \AA . N^{5+} связан с тремя атомами O^{2-} в тригональной плоской геометрии. Все длины связей N–O равны 1.26 \AA . Есть два неэквивалентных положения O^{2-} . В первом положении O^{2-} связан с тремя эквивалентными атомами K^{1+} и одним атомом N^+ в искаженной геометрии одинарной связи. Во втором

Исследование полосно-пропускающих фильтров на многомодовых микрополосковых резонаторах с проводником в форме шпильки*

Б.А. Беляев^{1,2}, С.А. Ходенков¹, А.М. Сержантов^{1,3}, И.В. Говорун^{1,2}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

³ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Исследованы полуволновые и четвертьволновые микрополосковые резонаторы (МПР) с прямоугольным полосковым проводником, расщепленным с одного конца щелью. Построены эквивалентные схемы на индуктивных и емкостных элементах для нижайших трех мод колебаний этих резонаторов, а также фильтров третьего порядка на их основе. Показано, что амплитудно-частотные характеристики настроенных на одинаковую полосу пропускания фильтров на трехмодовых МПР и их эквивалентных схем хорошо согласуются друг с другом. Установлено, что изменением ширины и длины щели полоскового проводника в форме шпильки можно на одном МПР создавать устройства, полосу пропускания которых формируют резонансы двух, трех и даже четырех нижайших мод колебаний. Определены границы реализуемых относительных ширин полос пропускания сконструированных фильтров второго, третьего и четвертого порядков.

Ключевые слова: диэлектрическая подложка, микрополосковый резонатор, полосно-пропускающий фильтр, амплитудно-частотная характеристика.

Введение

Хорошо известно, что полосно-пропускающие фильтры относятся к важнейшим элементам систем связи, радиолокации, радионавигации, а также различной измерительной и специальной радиоаппаратуры [1–4]. Как правило, именно фильтры определяют качество радиотехнических устройств, а нередко и их габариты. Широкое распространение в радиотехнике получили микрополосковые конструкции фильтров благодаря многим своим достоинствам [5–8]. Такие устройства технологичны в производстве [9–11], отличаются миниатюрностью [12–15], высокой надежностью, простотой и удобством в настройке [16–18], а также сравнительно низкой стоимостью. Важно отметить, что разработанные конструкции микрополосковых фильтров перекрывают огромный диапазон центральных частот f_0 – от десятков мегагерц до десятков гигагерц, при этом сравнительно просто реализуются устройства с относительной шириной полосы пропускания в пределах $\Delta f/f_0 \sim 1$ –100% [19–22].

В цифровых системах связи одним из путей увеличения скорости передачи информации является расширение полосы рабочих частот [23]. Поэтому разработка новых конструкций фильтров со сверхширокой относительной полосой пропускания (более 50%), обладающих необходимой избирательностью, малыми потерями, простотой в изготовлении и низкой себестоимостью при серийном производстве, – важная и актуальная задача. Как известно, сверхширокополосные фильтры легко реализуются каскадным соединением фильтра нижних частот с фильтром верхних частот [24, 25]. Однако такие конструкции имеют, как правило, большие габариты, поэтому в настоящее время активно исследуются микрополосковые конструкции фильтров на многомодовых резонаторах [26–29], в которых полосу пропускания формируют резонансы нескольких нижайших мод колебаний резонаторов, собственные частоты которых удастся сблизить, используя различные нерегулярности в их полосковых проводниках. Такие фильтры отличаются не только миниатюрностью, но и нередко меньшими потерями в полосе пропускания по сравнению с традиционными конструкциями.

В настоящей работе исследованы микрополосковые резонаторы (МПР), проводники которых с одного конца расщеплены щелью определенных размеров, и показаны возможности создания полосно-пропускающих фильтров на их основе. Рассмотрены четвертьволновые МПР, у которых нерасщепленный конец полоскового проводника замкнут на экран, поэтому на частоте первой мо-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, государственное задание FEFE-2023-0004.

Влияние структурно-фазовых превращений на механические свойства и разрушение β -титанового сплава в процессе комбинированной прокатки и старения*

И.П. Мишин¹, Е.В. Найденкин¹, Э.К. Александровский², А.И. Манишева¹

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

² ООО «Научно-технический центр ТМК», г. Москва, Россия

Изучено влияние старения в интервале температур 400–600 °С на структурно-фазовое состояние, механические свойства и разрушение сплава ВТ35, подвергнутого комбинированной прокатке (КП) в β -фазе. Показано, что КП и последующее старение при температуре 450 °С в течение 10 ч приводит к выделению в деформированной β -матрице мелкодисперсной α -фазы в виде пластин и частиц нанометрового размера с объемной долей 21%. Полученное структурно-фазовое состояние приводит к значительному повышению прочностных свойств сплава в два с половиной раза по сравнению с исходным состоянием. Предел прочности сплава, подвергнутого указанной механической обработке, повышается до 2000 МПа, а микротвердость – до 5.3 ГПа. Выявлено, что увеличение времени старения при сохранении температуры положительно влияет на механические свойства и характер разрушения, который меняется с хрупкого на хрупко-вязкий.

Ключевые слова: β -титановый сплав, комбинированная прокатка, старение, фазовые превращения, прочность, разрушение.

Введение

Титановые сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря хорошему сочетанию различных свойств, таких как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, высокая ударная вязкость, усталость и некоторые другие. Развитие научно-технического комплекса предъявляет все более высокие требования к применяемым материалам. Одним из наиболее перспективных методов решения данной задачи является деформационно-термическая обработка промышленных полуфабрикатов и изделий. Кроме того, достижение требуемых эксплуатационных и технологических свойств происходит за счет формирования ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, создания различных видов дефектов в кристаллической решетке через пластическую деформацию, а также фазовых превращений – разложения метастабильных соединений при последующем старении. Существует множество научно-исследовательских работ о влиянии такой обработки на структуру и свойства на примере ($\alpha+\beta$)-поликристаллических титановых сплавов [1–6]. Однако на примере более легированных β -титановых сплавов проведено гораздо меньше исследований [6–9]. В соответствии с «Прогнозом научно-технологического развития России: 2030» НИУ ВШЭ по направлению «Новые материалы и нанотехнологии» перспективными рынками являются авиакосмическая техника и инфраструктура, а также автотранспортные средства и дорожная инфраструктура. В группу инновационных продуктов входят новые типы легких и высокопрочных материалов, которые могут быть созданы на основе наноструктурированных сплавов титана [10]. Так, в США одним из самых перспективных β -сплавов на основе титана является Ti 15333, который обладает наилучшим комплексом свойств и наиболее близок по химическому составу сплаву ВТ35 [6].

Существует большое количество методов деформационно-термической обработки, разработанных для высоколегированных титановых сплавов [11–15]. Также возможно дополнительное повышение механических свойств этих сплавов за счет формирования УМЗ-структуры с применением методов интенсивной пластической деформации с последующей термообработкой [16, 17]. Применение данных методов, безусловно, будет иметь свои особенности по сравнению с другими классами титановых сплавов. На основании вышеизложенного в настоящей работе установлено влияние старения (отжига) при различных режимах температуры 400–600 °С и времени 5 и 10 ч на структурно-фазовое состояние, механические свойства и разрушение β -титанового сплава ВТ35 (Ti–15V–3Cr–3Al–3Sn–1Mo–1Zr), подвергнутого комбинированной прокатке (КП), после закалки из области β -фазы (800 °С).

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00033).

Макролокализация пластической деформации при одноосном сжатии в модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела*

Я.Д. Липатникова¹, Ю.В. Соловьева¹, И.Г. Вовнова¹, В.А. Старенченко¹,
Н.Н. Белов¹, Д.Н. Черепанов¹, Л.А. Валуйская²

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

² Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия

Анализируются условия и особенности формирования полос макролокализации пластической деформации монокристаллов в условиях одноосного динамического сжатия. Исследование проводилось теоретическим методом, основанным на многоуровневом моделировании, которое объединяет различные подходы к описанию пластической деформации. Модельное описание в трехмерной постановке задачи основано на синтезе моделей дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела. Численные расчеты проводились методом конечных элементов в авторском программном комплексе. Рассмотрен ряд сценариев развития пластической деформации элементарного объема деформируемой среды в виде зависимостей $\sigma(\epsilon)$, приводящих к различным картинам деформации макрообъема: однородной деформации, формированию устойчивой макролокализации в виде полос интенсивного сдвигообразования, размытию полос локализованного сдвига.

Ключевые слова: моделирование, механика упругопластической среды, дислокационная кинетика, макролокализация, метод конечных элементов.

Введение

Локализация пластического течения – это явление, которое неразрывно связано с процессом деформации кристаллических материалов, так как пластическое течение протекает неоднородно на любом этапе [1]. Локализация проявляется на разных масштабных уровнях деформации. На микроуровне локализация пластического течения проявляется в образовании линий деформационного рельефа, сформированных микросдвигами по плоскостям скольжения, и характеризуется последовательностями субструктурных превращений, обеспечивающих пластичность металлических материалов [2]. Локализации на макроуровне, примерами которых являются образование шейки при растяжении, полосы Чернова – Людерса [3–5], полосы адиабатического сдвига [6–8] при динамическом нагружении, полосы суперлокализации пластической деформации [9–11], зачастую являются негативными явлениями, которые могут препятствовать качественной обработке и формированию металлических изделий, а также служить причиной их разрушения. Также локализация пластической деформации наблюдается на промежуточном между микро- и макроуровнем – мезоуровне. В качестве одного из примеров проявления неоднородности на этом масштабном уровне в работах [12, 13] приводится описание полос сдвига в поликристаллических материалах.

Локализации пластического течения по мере развития деформации могут последовательно переходить от низких к более высоким масштабным уровням [3, 14], достигая макроуровня, и при неограниченном развитии приводят к катастрофической потере устойчивости деформации и разрушению материала. В случае, когда аккомодационные механизмы останавливают развитие локализации, деформация становится более однородной. Если такие процессы происходят на более высоких масштабных уровнях, то это отражается на кривой течения, которая приобретает немонотонный характер. Примерами таких кривых могут быть деформационные кривые с зубом текучести [4, 5] при образовании полос Чернова – Людерса. Также в некоторых материалах с развитием макролокализаций пластической деформации связана прерывистая текучесть [3, 15–17] – кривая течения в этом случае демонстрирует колебания напряжений течения.

В настоящей работе в модели синтеза дислокационной кинетики и механики деформируемого твердого тела [10] проведено исследование формирования полос макролокализованной деформации в условиях одноосного сжатия. Рассмотрены несколько сценариев развития пластического течения элементарных объемов деформируемой среды при наличии концентраторов напряжений.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

Исследование реактивных напряжений в сплавах на основе никелида титана

А.В. Гусева¹, В.А. Плотников¹, А.С. Грязнов^{1,2}

¹ Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

² Алтайский государственный медицинский университет, г. Барнаул, Россия

Исследованы реактивные напряжения, возникающие в образцах сплавов на основе никелида титана в условиях внешнего противодействия возврату деформации. Показано, что уровень реактивных напряжений, развиваемых в образце в цикле нагрев – охлаждение снижается и выходит на насыщение в процессе многократного циклирования мартенситных превращений. Характерно, что величина реактивных напряжений может превышать предел текучести сплава. Наблюдаемый эффект может быть связан с упрочнением сплава за счет фазового наклепа.

Ключевые слова: реактивные напряжения, никелид титана, термоупругие мартенситные превращения, эффект памяти формы, мартенситная деформация.

Введение

Характерные механические свойства сплавов на основе никелида титана (TiNi) – эффект памяти формы и сверхэластичность есть проявление мартенситного механизма накопления и возврата деформации в цикле термомартенситных превращений $B2 \rightarrow B19'$ и $B19' \rightarrow B2$ [1]. Реактивные напряжения возникают как результат фиксации мартенситной деформации и невозможность ее возврата в ходе обратного термоупругого превращения $B19' \rightarrow B2$. Ключевым механизмом формирования реактивных напряжений в сплавах на основе никелида титана является неспособность обратного движения мартенситной границы в кристалле [2, 3]. Реактивные напряжения при отсутствии механизмов их релаксации могут вызывать разрушение образца, что обусловлено образованием микротрещин в материале, а также активировать диффузионное перемещение, что может приводить к формированию вторичных фаз Ti_2Ni , $TiNi_3$ [4, 5].

При термоупругих мартенситных превращениях наблюдается накопление структурных дефектов в результате пластической релаксации микронапряжений, генерируемых на межфазной границе. Явление носит название фазового наклепа, упрочняющего сплав. Процесс пластической релаксации сопровождается диссипацией энергии в ходе производства полных дислокаций при достижении напряжениями на межфазной границе предела текучести сплава [6]. Таким образом, механизм фазового наклепа заключается в формировании и наследовании дислокационной структуры при фазовом превращении $B2 \rightarrow B19'$.

Склонность сплава к фазовому наклепу зависит от разности между пределом текучести и напряжением мартенситного сдвига. Соответственно, чем меньше величина разности, тем сплав на основе никелида титана более склонен к фазовому наклепу. Близкое к пределу текучести значение напряжения мартенситного сдвига свидетельствует о высокой вероятности локального достижения микронапряжениями напряжения пластического (дислокационного) сдвига [7]. По своему физическому смыслу напряжение мартенситного сдвига для сплавов с термоупругими мартенситными превращениями является стимулом для образования и роста кристаллов мартенситной фазы при механическом нагружении [8]. Экспериментально показано, что термоциклирование в интервале температур, содержащем интервал мартенситных превращений, повышает предел текучести и коэффициент деформационного упрочнения при температуре выше температуры конца обратного мартенситного превращения [9].

В ходе рентгеновских исследований мартенситных превращений в никелиде титана в условиях нагружения было установлено наличие мартенситной фазы при высоких температурах и высокотемпературного эффекта памяти формы [4]. Это свидетельствует о стабилизации мартенситной фазы, которая связана с действием локализованных механических напряжений, накапливающихся при циклировании мартенситных превращений как без нагрузки, так и в условиях механического нагружения [4]. То есть обратное мартенситное превращение при завершении температурного цикла может затянуться в область высоких температур.

Влияние циклической ползучести на усталостное поведение дисперснонаполненных термопластичных композитов*

А.А. Богданов¹, С.В. Панин¹, А.В. Еремин¹, Д.Г. Буслович¹

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

Проведено исследование развития циклической ползучести при воздействии знакопеременных нагрузок на термопластичные композиты на основе полиимида (ПИ) и полиэфиримида (ПЭИ), наполненные короткими углеродными волокнами. Показано, что в режиме малоциклового усталости долговечность ПИ-композитов была в разы выше, а скорость роста циклической ползучести в разы ниже, чем для идентично наполненных ПЭИ-композитов. Более высокая скорость роста циклической ползучести для композитов с ПЭИ-матрицей объясняется большей гибкостью макромолекулы полимера и, как следствие, большей способностью к необратимой перестройке структуры.

Ключевые слова: дисперсно-наполненный композит полиимид, полиэфиримид, малоцикловая усталость, петля механического гистерезиса, циклическая ползучесть.

Введение

При малоциклового усталости конструкционных материалов развитие циклической ползучести играет доминирующую роль в их усталостном разрушении. Поскольку площадь петли механического гистерезиса связана с величиной энергии деформации, затрачиваемой на рассеяние в виде тепла, циклической ползучести и на развитие повреждений, параметры петли механического гистерезиса можно использовать для анализа поврежденности при циклических испытаниях. В качестве таких критериев могут быть использованы динамический и секущий модули упругости (либо их изменение со временем), площадь петли гистерезиса и др. Для композитных материалов снижение модуля может указывать на развитие циклических повреждений. Дисперсно-наполненные полимеры проявляют свойство вязкоупругости, что при циклической нагрузке проявляется в виде формирования петли механического гистерезиса. Параметры петли в течение циклического нагружения также могут меняться, но их изменение напрямую не связано с развитием повреждений [1].

Площадь петли механического гистерезиса, пропорциональная плотности энергии деформации, многими авторами считается информативным параметром для описания деформационного поведения при усталости. Однако как энергетический параметр она чувствительна к влиянию средней деформации. При этом в общем термодинамическом понимании площадь петли определяется суперпозицией вклада диссипации и изменения запасенной энергии. В свою очередь, изменение средней осевой деформации, как правило, вызвано эффектами как циклической ползучести и вязкоупругости, так и накоплением повреждений [2]. Влияние средней деформации на усталостное поведение изучалось на примере аморфного полиэтилена [3], а также высокоэффективных полимеров, в частности ПЭЭК [4].

I. Raphael, N. Saintier et al. [5] на примере полиамида, наполненного короткими стеклянными волокнами, выделяют два механизма циклического повреждения: циклическую ползучесть и диссипацию энергии. В связи с этим в качестве критериев оценки усталостной долговечности армированных термопластов они применяли циклическую скорость деформации и величину неупругой энергии. Показана возможность оценки усталостной долговечности по изменению этих параметров.

В целом, в литературе имеется недостаточно данных о развитии циклической ползучести при усталостных испытаниях в режиме контроля нагрузки. В этой связи представляет интерес изучение усталостного поведения класса полимеров с высокими эксплуатационными свойствами, таких как полиимид и полиэфиримид, армированных короткими углеродными волокнами. В основу может быть положен расчет величины циклической ползучести, что позволит количественно оценить вклад циклической ползучести в разрушение дисперсно-армированных полимеров.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0010.

Микроструктура и фазовый состав сплава TiNi, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства*

М.Ю. Панченко¹, А.С. Нифонтов¹, С.В. Астафуров¹, К.А. Реунова¹,
Е.А. Загибалова¹, Е.А. Колубаев¹, Е.Г. Астафурова¹

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

Приведены данные о микроструктуре, фазовом составе и микротвердости образцов сплавов TiNi в виде плоских вертикальных «стенок» высотой 110 мм, изготовленных методом двухпроволочного электронно-лучевого аддитивного производства (с одновременной подачей проволок Ti и Ni) при разных условиях: без охлаждения и с принудительным охлаждением подложки в процессе осаждения. Показано, что независимо от условий процесса аддитивного производства полученные образцы сплавов TiNi обладают гетерофазной структурой. Основными являются фазы TiNi₃ и TiNi (B2), при этом объемная доля фазы TiNi₃ снижается по мере удаления от подложки: в верхних слоях образцов обоих типов она значительно ниже ($\approx 30\%$), чем в нижних ($\approx 50\%$). В верхних слоях аддитивно выращенных образцов также формируется фаза Ti₂Ni₃. Принудительное охлаждение подложки во время аддитивного роста приводит к образованию нежелательной фазы Ti₂Ni в центральной части образцов сплава TiNi. Установлено, что в нижней части образца, полученного без принудительного охлаждения, микротвердость постепенно снижается от $H_m \approx 6000$ МПа вблизи подложки до ≈ 5000 МПа на расстоянии $x \approx 4$ мм от нее. А в центральной и верхней частях образца микротвердость не зависит от x : значения находятся в интервале 4500–5500 МПа. Для образца TiNi, полученного с принудительным охлаждением подложки в процессе аддитивного производства, стадийность зависимости $H_m(x)$ имеет качественно аналогичный характер за исключением скачкообразного изменения микротвердости в интервале 4500–7000 МПа в центральной части образца, вызванного формированием интерметаллидной фазы Ti₂Ni.

Ключевые слова: сплав TiNi, аддитивные технологии, двухпроволочное аддитивное производство, фазовый состав, микроструктура.

Введение

Сплавы на основе никелида титана (сплавы TiNi) являются одними из наиболее успешно применяемых функциональных материалов, проявляющих эффект памяти формы и сверхэластичность. Благоприятное сочетание механических и служебных свойств, включая высокую износостойкость, устойчивость к коррозии, биосовместимость и уникальные демпфирующие возможности, позволяют данным сплавам широко применяться в различных отраслях, таких как медицина, авиастроение и космическая промышленность [1, 2].

В последние годы аддитивное производство (АП) становится многообещающим подходом к изготовлению деталей из TiNi со сложной геометрией, которую трудно, а иногда невозможно получить с помощью традиционных методов литья или порошковой металлургии [3]. Большой интерес исследователей направлен на методы порошкового аддитивного производства изделий из TiNi [3–5], однако низкая производительность процесса и высокая стоимость исходного порошкового материала ограничивают широкое коммерческое применение этого метода [6]. Поэтому проволочные аддитивные технологии стали рассматриваться в качестве перспективных методов для создания компонентов, выполненных из сплавов TiNi. Использование проволоки в качестве сырья для аддитивного производства позволяет избавиться от многих недостатков использования порошков и дает возможность создать изделия большего объема, увеличить скорость осаждения, уменьшить производственные затраты и увеличить коэффициент используемого материала [7]. J. Wang et al. [8] одними из первых успешно применили проволочное дуговое аддитивное производство для создания обогащенной по никелю TiNi-заготовки с помощью одновременной подачи двух проволок из чистого никеля и титана. Полученная ими заготовка обладала высокими прочностными характеристиками и низкой пластичностью из-за формирования неоднородной и анизотропной микроструктуры с высоким содержанием вторичных интерметаллидных фаз: TiNi₃, Ti₂Ni₃ и Ti₃Ni₄. В работе Н. Ресниной [9] методом электродуговой послышной наплавки проволоки из сплава с памятью формы Ni_{50.9}Ti_{49.1} также успешно был получен 3D-образец типа «рамка-мост», но из-за легирования аддитивно-полученного образца элементами, входящими в состав подложки (Fe, C),

* Работа выполнена в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0005.

Структурные особенности и закономерности формирования мишени для ВЧ-магнетронного распыления из биметаллических частиц Cu–W*

К.А. Просолов¹, В.В. Ластовка¹, А.И. Толмачев¹, М.А. Химич^{1,2},
К.В. Сулиз¹, С.О. Казанцев¹, А.С. Ложкомоев¹, Ю.П. Шаркеев^{1,3}

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

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

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Исследован метод синтеза мишеней из порошковых смесей Cu–W, полученных методом электровзрыва. Рассмотрены оптимальные параметры процесса и структурно-фазовый состав полученных мишеней. Основными фазами являются Cu и W с рефlekсами фазы Cu₂WO₄ в мишени с меньшим содержанием W. Показана эрозия мишеней при ВЧ-распылении и изменение формы кластеров в покрытии при увеличении мощности. Ранее исследования в этой области не уделяли должного внимания синтезу мишеней с высоким содержанием W и влиянию параметров процесса на качество получаемых покрытий.

Ключевые слова: высокочастотное магнетронное распыление, несмешивающиеся металлы, функциональные покрытия, электровзрыв, нанопорошки.

Введение

В последние десятилетия магнетронное распыление зарекомендовало себя как эффективный метод нанесения тонких пленок на различные поверхности. Данный метод является основным в области тонкопленочных технологий и находит широкое применение в множестве отраслей, таких как электроника, оптика, машиностроение, а также в авиационной и космической промышленности. Одним из ключевых факторов, определяющих качество получаемых покрытий, является состав и структура мишеней, которые используются для магнетронного распыления. Пленки тугоплавких соединений переходных металлов периодической системы, а также алмазоподобные пленки в настоящее время активно исследуются, так как являются перспективными кандидатами для решения проблемы функционализации поверхности [1]. В последнее время отмечается повышенный интерес к мультифункциональным покрытиям на основе наноразмерных систем Cu–W, которые применяются в фотокатализе, микроэлектронике, в качестве газовых сенсоров и биоразлагаемых материалов с антимикробными свойствами. Применение покрытий на основе систем Cu–W в области медицины остается малоизученным, хотя в современных исследованиях, выполненных представителями зарубежных научных школ, отмечаются антибактериальные свойства оксида вольфрама (WO_{3-x}) и оксида вольфрама, легированного медью.

В известных из литературы работах такие покрытия получают осаждением из плазмы магнетронного разряда с использованием дуальной системы, что значительно повышает стоимость медицинского изделия, функционализированного таким способом. Изготовление мишеней системы Cu–W до сих пор является вызовом для ученых и технологов [2]. Среди способов осаждения покрытий метод высокочастотного (ВЧ) магнетронного распыления является одним из самых высокотехнологичных и позволяет контролировать формирование пленок в широком диапазоне свойств [3]. Метод занимает лидирующее место среди способов нанесения покрытий конденсацией из паровой фазы [4]. Так удается синтезировать наноструктуры различного размера и формы с регулируемой поверхностной плотностью и желаемыми геометрическими параметрами. Данный эффект связывают с фокусировкой ионных потоков, поступающих на подложку [5]. Основным преимуществом метода является возможность сохранения состава покрытий при ВЧ-магнетронном распылении многокомпонентных мишеней, что является, несомненно, важным для биомедицинских целей. Кроме того, низкая температура разогрева материала подложки в процессе напыления позволяет наносить покрытия на различные полимеры и материалы на основе органических соединений [6].

Цель данной работы – разработка и изучение метода синтеза мишеней из порошковых смесей Cu–W с использованием уникального подхода, включающего прессование, синтез в вакууме и

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0007.

Исследование деформационного поведения композитного материала на основе керамического каркаса $ZrO_2(Y_2O_3)$ с биополимерным наполнителем при испытаниях на осевое сжатие*

И.Н. Севостьянова¹, Т.Ю. Саблина¹, В.В. Горбатенко¹

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

Приведены результаты исследования деформационного поведения композитного материала на основе керамического каркаса из $ZrO_2-Y_2O_3$ с биополимерным наполнителем. По сравнению с аналогичным керамическим материалом без наполнителя обнаружено увеличение предельной деформации до разрушения в образцах с объемом керамического каркаса 50 и 60%. Максимальное увеличение ϵ , в 1.5 раза, зафиксировано для композитной керамики с объемом керамического каркаса 50%. В работе прослежена эволюция пространственно-временных картин локализации деформации ϵ_{xx} в области сжимающих напряжений на фронтальной поверхности образцов композитной керамики с разным содержанием биополимерного наполнителя. Показано, что с увеличением объема, занятого биополимерным наполнителем, степень неоднородности распределения очагов локальных деформаций ϵ_{xx} вдоль оси нагружения по исследуемой боковой поверхности образца возрастает. Уменьшение объема керамического каркаса образцов и увеличение в них объема, занятого биополимерным наполнителем, приводит к повышению градиента между минимальными и максимальными конечными значениями накопленных локальных деформаций $\langle \epsilon_{xx} \rangle$.

Ключевые слова: композитная керамика, диоксид циркония, биополимерный наполнитель, механические свойства, осевое сжатие, корреляция цифровых изображений, локализация деформации.

Введение

Одной из актуальных проблем современного материаловедения является создание и развитие технологий изготовления структурно-функциональных материалов. В последние годы керамические материалы зарекомендовали себя в качестве перспективного материала для медицинского применения. Они активно применяются в медицине с различными целями – для изготовления медицинских инструментов, в качестве мембран для разделения и очистки биологических жидкостей, в качестве пористых дозаторов для введения лекарств, а также в качестве имплантатов в реконструктивной травматологии, онкологии, стоматологии [1–4]. В силу сочетания в керамике высокой химической, коррозионной стойкости и высокой прочности в эндопротезировании костной ткани наметилась устойчивая тенденция к замещению металлических искусственных имплантатов и имплантатов, изготовленных из высокомолекулярных соединений, керамическими материалами. Керамики не воспринимаются организмом как чужеродные материалы и, в отличие от металлов и полимеров, имеют одинаковый тип химической связи с неорганической составляющей костных тканей. Циркониевая керамика обладает высокой прочностью, стойкостью к химически-агрессивным средам и включена в реестр ISO как материал, допустимый к имплантации и остеозамещению [5]. Воссоздание в пористом керамическом каркасе структуры неорганического костного матрикса обеспечивает биомиметическое приближение искусственных керамических остеоимплантатов к костным тканям [6, 7]. Механические свойства костной ткани сложно охарактеризовать, поскольку кость представляет собой высокоиерархический природный композитный материал [8] и считается, что кость, как композитный материал, приобретает высокую прочность за счет жесткой минеральной фазы (≈ 50 мас.%), высокоэластичной органической фазы (≈ 30 мас.%) и воды (≈ 20 мас.%). Каждая из трех составляющих фаз кости вносит свой вклад в механическое поведение кости и включает в себя эластичные, пластические и вязкоупругие компоненты, однако точный вклад этих фаз в механическое поведение на уровне ткани плохо изучен. Чтобы понять механические свойства костного материала, важно исследовать механические свойства составляющих его фаз и структурные отношения между ними на различных уровнях иерархической структурной организации [9, 10]. Изготовление керамических образцов с иерархически организованной поровой структурой в совокупности со значительной долей заполненного вязким составляющим, подобным коллагену, порового пространства делает полученный материал аналогом костных тканей

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проекты FWRW-2021-0005 и FWRW-2021-0011.

Выявление влияния состава йодсодержащих нанотермитных систем Me_xO_y/Al ($Me = Cu, Fe, Mo$) на нейтрализацию бактериальных спор*

О.И. Гаенко¹, Е.В. Муравлев¹, С.С. Титов¹, В.А. Клименко¹, О.Б. Кудряшова^{1,2},
А.Б. Ворожцов², Е.С. Марченко², О.В. Кокорев², С.Д. Соколов², Р.А. Нефедов^{1,2}

¹ Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия

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

Бактерии и вирусы являются одними из наиболее распространенных и опасных патогенов для организма человека. Их наличие в окружающей среде приводит к различным заболеваниям. В работе представлен способ нейтрализации бактериальных спор с применением йодсодержащих нанотермитных систем. Установлено, что значение индекса микробицидной активности снижается с увеличением концентрации йода в составе смеси на основе оксида меди и кристаллического йода. Максимальное значение $Z = 80\%$ характерно для образца с содержанием йода (I_2) 20 мас.%. Максимальное значение микробицидной активности для систем с кристаллическим йодом и оксидом железа $Z = 58\%$, с оксидом молибдена $Z = 6\%$. Системы на основе йодоформа и оксида меди демонстрируют обратную зависимость значения индекса микробицидной активности. Значение $Z = 90\%$ соответствует системе с максимальным содержанием йодоформа 40 мас.%. Снижение содержания йодоформа до 20 мас.% приводит к уменьшению значения $Z = 65\%$. Максимальное значение микробицидной активности для систем с йодоформом и оксидом железа $Z = 30\%$, для оксида молибдена $Z = 63\%$. Показано, что использование оксида меди в йодсодержащих нанотермитных системах существенно влияет на микробицидную активность за счет улучшения теплопроводности, ускорения горения, эффективного распределения йодных паров и увеличения тепловой энергии, выделяемой в процессе реакции.

Ключевые слова: нанотермит, микробицидная активность, йод, бактерии, дезинфекция.

Введение

Наличие бактерий и вирусов в окружающей среде является одним из основных источников заболеваний человека, вызывающих серьезные осложнения вплоть до летального исхода. В качестве примера можно привести глобальную угрозу здоровью, вызванную вирусом SARS-CoV-2 (COVID-19). Во время кашля, чихания и даже разговора в воздухе могут образовываться микрокапли слюны содержащие вирус, что способствует его распространению в атмосфере [1]. Кроме того, загрязнение атмосферы в результате техногенных аварий и террористических актов также представляет собой серьезную глобальную проблему [2, 3]. В этом контексте особенно актуальным становится разработка новых и модификация существующих технологий и веществ для эффективной нейтрализации опасных химических и биологических агентов в атмосфере воздуха.

Методы борьбы с опасными бактериями и вирусами, такие как использование антибиотиков, противовирусных препаратов, вакцин и других медицинских средств, могут столкнуться с устойчивостью некоторых патогенов, снижающей их эффективность. Более того, применение антибиотиков и противовирусных препаратов может привести к развитию резистентности к ним, усложняя лечение инфекций.

Аэрозольная дезинфекция воздуха представляет собой эффективный метод борьбы с бактериальными и вирусными агентами [4, 5]. Существующие в настоящее время методы дезинфекции воздуха требуют модификации в целях безопасности, экологичности и быстродействия процесса. Необходимо разрабатывать высокоэффективные методы дезинфекции опасных агентов, отвечающие этим требованиям.

В качестве потенциальных антибактериальных и противогрибковых агентов можно применять наночастицы оксидов металлов, такие как Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , ZnO , MgO , Al_2O_3 и др. Их относительно низкая токсичность по отношению к клеткам человека, эффективное ингибирование широкого спектра бактерий в зависимости от размера, способность предотвращать образование биопленок и уничтожать споры делают их перспективными для применения в качестве антибактериальных средств [6, 7]. Так, медь обладает бактерицидными и антимикробными свойствами, является биосовместимым элементом с живыми организмами, поэтому наночастицы CuO называют перспективными кандидатами на роль новых антибиотиков [7]. Наночастицы железа обладают

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-69-00108, <https://rscf.ru/project/22-69-00108/>.

Ag и Pt–Ag катализаторы на основе CeMnO_x для процесса горения сажи*

М.В. Грабченко¹, Т.С. Харламова¹, Е.С. Львова¹,
Т.А. Бугрова¹, Д.Б. Васильченко², О.В. Водянкина¹

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

² *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Комплексом физических методов (РФА, КРС, СЭМ с ЭДА, ТПВ-Н₂) исследованы морфология, структура и физико-химические свойства Ag и биметаллических Ag–Pt катализаторов (с низким содержанием благородных металлов – 1 мас.% Ag и 0.1 и 0.5 мас.% Pt) на основе CeO_2 , MnO_x и CeMnO_x ($\text{Ce/Mn} = 1$). Моно- и биметаллические Ag–Pt катализаторы на CeMnO_x носителе исследованы в процессе горения сажи. Установлено, что введение 0.1 и 0.5 мас.% Pt в Ag/ CeMnO_x незначительно улучшило скорость горения сажи из-за быстрого окисления Pt центров кислородом. Показано, что лучшие каталитические свойства ($T_{\text{max}} = 457$ °C) в процессе горения сажи проявил Ag/ CeMnO_x катализатор за счет формирования дефектной «лоскутной» нанодоменной микроструктуры, которая позволяет сохранить активность после термического состаривания катализатора при 650 °C, 12 ч ($\Delta T_{\text{max}} = 8$ °C).

Ключевые слова: серебряные катализаторы, биметаллические Ag–Pt, горение сажи, CeMnO_x носитель, доменная микроструктура.

Введение

В связи с увеличением числа транспортных средств с дизельными двигателями, а также промышленных процессов, связанных с нефтепереработкой, проблема выбросов твердых дисперсных частиц сажи (твердых углеродных частиц) в выхлопных газах становится все более актуальной. Дисперсные частицы сажи долгое время находятся во взвешенном состоянии в воздухе или способны проникать в живые организмы через легкие и кожу. Длительное воздействие сажи может вызвать или усугубить большое количество заболеваний легких и сердца, включая их мутагенные изменения. Образующаяся сажа также нарушает нормальную работу двигателей из-за загрязнения выхлопных систем транспорта, генерации выхлопных шлейфов, блокировки труб. Таким образом, разработка материалов, предотвращающих вредное воздействие сажи на окружающую среду, здоровье человека и эксплуатацию транспортных средств является важной задачей.

Каталитическая реакция сжигания сажи представляет собой сложную реакцию глубокого окисления, происходящую на границе трех фаз сажа/катализатор/воздух при участии окислителей O_2 и/или NO . В последнее десятилетие были предложены и исследованы различные катализаторы для процесса горения сажи: системы на основе драгоценных металлов [1, 2], в том числе биметаллические Pt–Ag, Pt–Cu, Pt–Pd [3], и оксидов переходных редкоземельных металлов [4–7]. Каталитические системы на основе благородных металлов, таких как палладий и платина, родий, нанесенных на оксидные носители (например, CeO_2 , Al_2O_3), широко исследуются, что связано с их высокой активностью в окислительных процессах [8, 9]. Однако ограниченная доступность и колеблющаяся стоимость этих материалов являются стимулом для поиска других относительно дешевых альтернатив.

Большой интерес в данной области представляют катализаторы без использования благородных металлов или с их низким содержанием, нанесенные на церийсодержащие оксидные носители, которые являются наиболее привлекательными ввиду выдающейся способности CeO_2 накапливать и выделять кислород за счет обратимого цикла между состояниями Ce^{3+} и Ce^{4+} и его относительно низкой стоимости. Также среди оксидов переходных металлов особое внимание занимает MnO_x вследствие его высокой активности, срока службы и низкой токсичности, а также ряда уникальных химических и физических свойств. Обзор литературы [10–13] показывает, что комбинация преимуществ благородных металлов и оксидов переходных металлов позволяет существенно повысить активность катализаторов в направлении окисления вредных соединений, в том числе сажи. Получение сплавов благородных металлов рассматривается в качестве эффективной стратегии для улучшения активности катализаторов в процессах глубокого окисления, также резко возрастает интерес к биметаллическим наночастицам, электронные и структурные свойства которых

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-1388).

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 53.023, 538.935

DOI: 10.17223/00213411/66/12/14

Эвристическая формула для оценки эффективной длины диффузии фотогенерированных носителей заряда в ИК-фотоприемных матрицахА.В. Вишняков¹, В.А. Стучинский¹, В.В. Васильев¹¹ *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Предложена простая формула для оценки эффективной латеральной длины диффузии фотогенерированных носителей заряда из линейного пятна засветки в слое абсорбера диодных фотоприемных матриц на основе материала кадмий – ртуть – теллур в условиях максимального отбора фототока из абсорбера.

Ключевые слова: диффузия, длина диффузии, носители заряда, фотоприемная матрица, материал кадмий – ртуть – теллур, абсорбер.

Введение

Знание величин длин диффузии фотогенерированных носителей заряда (ФНЗ) в фотоприемных матрицах на основе материала кадмий – ртуть – теллур (КРТ) в разных режимах работы существенно как для анализа фотоэлектрических процессов в фотоприемных приборных структурах, так и для понимания того, какие факторы и каким образом определяют значения характеристик соответствующих фотоприемных устройств (см., например, [1–10]).

С другой стороны, исследователям и разработчикам фотоприемных матриц очень важно уметь прогнозировать и характеризовать их качество и, в частности, частотно-контрастные характеристики, для того чтобы можно было обеспечить высокое пространственное разрешение ИК-камеры в целом [11–15].

Одним из относящихся сюда вопросов является вопрос о значении эффективной длины диффузии (длины распространения) ФНЗ $l_{d\text{eff}}$, реализующейся в таких матрицах в нормальном режиме их работы с обратносмещенными диодами, действующими как сток для неравновесных носителей заряда. Поскольку к обычной рекомбинации в пленке добавляется рекомбинация на p – n -переходах фотодиодов, длина $l_{d\text{eff}}$ оказывается значительно меньше объемной длины диффузии ФНЗ l_d в материале абсорбера.

При измерении пространственных профилей фотоответа диода матрицы $S(x)$ в ходе сканирования этим диодом линейного пятна засветки (кривая 1 на рис. 1) длина $l_{d\text{eff}}$ определяет наклон участка профиля, обозначенный цифрой 3; далее спад фотоответа S с координатой x затормаживается из-за влияния дифрагированного излучения. Попутно отметим, что наклон профилей $S(x)$ при малом отборе фототока из абсорбера (кривая 2) определяется объемной длиной диффузии ФНЗ l_d в материале абсорбера [9]. Таким образом, участок с максимальным наклоном профиля фотоответа диода остается в настоящее время единственным относящимся к рассматриваемой теме предметом исследования, не покрытым содержательными аналитическими результатами.

Хотя интересующая нас длина $l_{d\text{eff}}$ может быть определена, например, посредством Монте-Карло-моделирования процесса диффузии ФНЗ в рассматриваемых структурах, такие расчеты требуют затрат усилий и времени на программирование и проведение вычислений [16]. В этих условиях можно было бы приветствовать появление более простых (хотя, может, и приближенных) средств оценки длины $l_{d\text{eff}}$.

В настоящей работе предлагается простая эвристическая формула для оценки длины диффузии ФНЗ $l_{d\text{eff}}$ в фотоприемных КРТ-матрицах с квадратными диодами и варизонно-пассивированными границами слоя абсорбера, реализующейся в условиях сканирования линейного пятна засветки диодом матрицы в условиях максимального отбора фототока из абсорбера. Интерес в этом контексте представляют прежде всего фотоприемные матрицы, в которых объемная длина диффузии ФНЗ в абсорбере l_d заметно превосходит размеры как их фотодиодов, так и фото-

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 538.915

DOI: 10.17223/00213411/66/12/15

Спектры фото- и электролюминесценции гетероструктур со множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ *Е.Р. Бурмистров¹, Л.П. Авакянц²¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Получены спектры фото- и электролюминесценции светодиодных гетероструктур со множественными квантовыми ямами (МКЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ в активной области. Фотолуминесценция возбуждалась лазером с длиной волны излучения 405 нм при комнатной температуре. Спектры электролюминесценции были получены при постоянном токе в диапазоне от 4 до 12 мА с шагом 2 мА. На основании численного самосогласованного решения уравнения Шредингера и электронейтральности Пуассона рассчитаны значения энергетических уровней и распределение плотности основных носителей заряда в одиночной КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Результаты расчетов позволили связать максимумы в спектрах фото- и электролюминесценции с межзонными оптическими переходами основных носителей заряда в КЯ InGaN . Установлено, что наблюдаемые полосы в спектрах фотолуминесценции соответствуют фундаментальному переходу в КЯ InGaN между невозбужденными дырочными и электронными уровнями валентной зоны и зоны проводимости.

Ключевые слова: гетероструктуры, фотолуминесценция, электролюминесценция, квантовые ямы, электронный газ, излучение.

Введение

Полупроводниковые гетероструктуры со множественными квантовыми ямами (МКЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ широко используются в оптоэлектронике в качестве светодиодов (СД), работающих в синем и зеленом диапазонах оптического спектра [1, 2]. Например, ультрафиолетовые (УФ) СД на основе гетероструктур с МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ обладают 40%-й эффективностью излучения [3].

В серийном производстве готовых светодиодных устройств с МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ используется рост вдоль кристаллографического направления (0001) гексагонального GaN . Это приводит к тому, что в квантово-размерных структурах на основе GaN вюрцитной модификации возникают встроенные электрические поля, вызванные спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями. Характерной особенностью гетероструктур $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ являются малые значения спонтанной поляризации.

Основное влияние на динамику излучательной рекомбинации носителей заряда в МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ оказывают встроенные пьезоэлектрические поля, вызванные рассогласованием постоянных кристаллических решеток между слоями InGaN и GaN [4, 5]. Влияние пьезоэлектрических полей на скорость рекомбинации носителей заряда в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ исследуют по смещениям максимумов в спектрах фотолуминесценции в зависимости от плотности потока возбуждающего излучения [6, 7].

В работе [8] авторы исследовали влияние буферного слоя AlGaIn на спектры фото- и электролюминесценции гетероструктур $\text{InGaN}/(\text{Al})\text{GaIn}$. В спектрах фотолуминесценции, помимо сдвигов, обусловленных воздействием встроенных пьезоэлектрических полей, наблюдались сдвиги, связанные с влиянием слоя AlGaIn .

Авторы работы [9] исследовали влияние высокотемпературного отжига и имплантации атомами примеси на спектры фотолуминесценции гетероструктур с МКЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Было показано, что отжиг не влияет на положение и форму основной полосы, при этом легирование приводит к уменьшению ее интенсивности.

В работах [10, 11] исследовались светоизлучающие свойства лазеров на основе гетероструктур с различным числом КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ методом фотолуминесцентной спектроскопии. Показано, что увеличение числа КЯ в активной области приводит к усилению выходной мощности гетеролазера.

* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Регистрация паров бензола и толуола анализатором ртути на основе поперечного эффекта Зеемана*

В.В. Татур¹, А.А. Тихомиров¹

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследованы особенности регистрации паров бензола и толуола анализатором ртути ДОГ-07 (на основе поперечного эффекта Зеемана), линии излучения которого попадают на полосы поглощения этих газов. Показано, что постепенное увеличение в измерительной кювете анализатора концентрации молекул бензола приводит к увеличению регистрируемой концентрации газа. Такое же увеличение вводимой концентрации паров толуола приводит к неоднозначному значению регистрируемых величин концентраций. Приведены возможные причины наблюдаемых явлений.

Ключевые слова: анализатор ртути, поперечный эффект Зеемана, пары бензола и толуола, регистрация.

Введение

Природный газ (ПГ), а также попутный нефтяной газ различных месторождений могут содержать в своем составе пары ртути с концентрацией до 4 мг/м^3 [1, 2]. Прокачка газа с таким количеством Hg приводит к коррозии газопроводов, а его сжигание – к загрязнению окружающей среды. Фирмой «Люмекс» (г. С.-Петербург) разработана методика определения концентрации ртути N_{Hg} в природном газе с использованием анализатора ртути РА-915М с приставкой РП-91НГ [3]. В этом анализаторе в качестве источника излучения применена ртутная капиллярная лампа (РКЛ), наполненная изотопом ^{204}Hg при низком давлении и помещенная в постоянное магнитное поле, которое обеспечивает в продольном эффекте Зеемана (ЭЗ) расщепление резонансной линии $\lambda_0 = 253.7 \text{ нм}$ на σ^+ - и σ^- -компоненты [4, 5]. При определенном значении индукции магнитного поля B излучение σ^- -компоненты (λ_{off}) выводится на край полосы поглощения смеси изотопов, содержащихся в атмосферной ртути, а излучение σ^+ -компоненты (λ_{on}) остается внутри этого контура [6, 7]. Таким образом реализуется методика дифференциального поглощения в анализаторе.

Наличие в составе ПГ различных примесных газов, таких как бензол, толуол, сероводород и др., которые имеют электронно-колебательные полосы поглощения вблизи $\lambda_0 = 253.7 \text{ нм}$, ограничивает чувствительность анализаторов ртути, использующих РКЛ в продольном ЭЗ [6, 7]. Это происходит вследствие того, что такие примесные газы поглощают излучение длин волн λ_{on} и λ_{off} , причем в разной степени. Особенно на работу таких анализаторов влияет присутствие в составе ПГ бензола с концентрацией более 1 мг/м^3 [3]. Это связано с тем, что присутствие таких примесных газов в составе ПГ приводит к искажению значения концентрации N_{Hg} , измеряемой анализатором.

В [8] показано, что анализатор ртути ДОГ-07 [9] на основе поперечного ЭЗ обладает меньшей зависимостью от таких примесных газов, как бензол (C_6H_6) и толуол ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$), концентрация которых в составе ПГ может составлять $5\text{--}320 \text{ мг/м}^3$ для C_6H_6 и $3.5\text{--}100 \text{ мг/м}^3$ для $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ в зависимости от месторождения [2]. Было установлено, что при добавлении паров бензола или толуола в концентрациях до 10 мг/м^3 в измерительную кювету анализатора ДОГ-07, где уже находятся пары ртути в концентрации более 30 нг/м^3 , ошибки в измерении концентрации N_{Hg} не наблюдается [8]. При этом выявлено, что добавление в измерительную кювету анализатора паров бензола с концентрацией более 10 мг/м^3 всегда завышало величину измеренного значения N_{Hg} . Введение в кювету анализатора паров толуола различных концентраций приводило к неоднозначным значениям регистрируемых величин N_{Hg} (к дополнительному увеличению или уменьшению показаний анализатора).

В настоящей работе представлены результаты регистрации паров бензола или толуола с помощью анализатора ДОГ-07 при плавном увеличении концентрации вводимых в его измерительную кювету этих газов, т.е. при увеличении их парциального давления в составе газовой смеси. Описана одна из возможных причин наблюдаемого явления.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FWRG-2021-0006).

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 621.373

DOI: 10.17223/00213411/66/12/17

**Возбуждение квантового осциллятора
короткими электромагнитными импульсами:
зависимость от абсолютной фазы***В.А. Астапенко¹, Т.К. Бергалиев¹, С.В. Сахно¹

¹ *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Долгопрудный, Россия*

Исследуется влияние абсолютной фазы на вероятность возбуждения квантового осциллятора из основного в стационарное состояние под действием короткого электромагнитного импульса с гауссовской огибающей. Точное решение сравнивается с результатом приближения площади импульса. Рассчитаны и проанализированы временные и спектральные вероятности возбуждения для различных значений абсолютной фазы импульса. Определено необходимое условие возникновения фазовых эффектов.

Ключевые слова: квантовый осциллятор, электромагнитный импульс, абсолютная фаза, вероятность возбуждения.

Введение

Взаимодействие ультракоротких электромагнитных импульсов (ЭМИ) с веществом является важной темой современной фундаментальной и прикладной физики [1]. Значительные успехи, достигнутые в последние десятилетия по генерации ЭМИ с заданными параметрами [2], включая контроль фазы несущей по отношению к огибающей (абсолютной фазы (АФ)), делает актуальным теоретическое рассмотрение влияния АФ на основные характеристики электромагнитного возбуждения мишени. Квантовый осциллятор (КО) является важнейшей базовой моделью для описания таких процессов для широкого круга мишеней, поскольку допускает аналитическое описание электромагнитного взаимодействия любой силы.

Возбуждение квантового осциллятора рассматривалось в многочисленных работах, начиная с классической статьи Дж. Швингера [3], в которой было получено общее выражение для вероятности перехода между стационарными состояниями. Импульсное возбуждение КО также исследовалось с помощью решения уравнений Гейзенберга для операторов рождения и уничтожения [4, 5] и в рамках приближенного метода, основанного на использовании электрической площади импульса [6, 7].

Детальное исследование возбуждения КО мультицикловыми импульсами было проведено в работе [8] с использованием формулы Швингера. В ней рассматривались временные (от длительности импульса) и спектральные зависимости вероятности возбуждения КО импульсами с различными огибающими.

При переходе к мало- и субцикловым ЭМИ, помимо длительности, несущей частоты, амплитуды и формы огибающей, необходимо учитывать и влияние АФ на вероятность возбуждения/ионизации мишени. Так, в работе [9] на основании выведенной в ней в рамках теории возмущений формулы для вероятности фотопроцесса было показано, что возбуждение двухуровневой системы ультракоротким электромагнитным импульсом существенно зависит от АФ. Полученное в [9] выражение было использовано в работе [10] при исследовании фотоионизации акцепторных центров в алмазе под действием ЭМИ. Было, в частности, установлено, что в пертурбативном режиме возбуждения распределение дырок в валентной зоне существенно зависит от АФ только для субцикловых импульсов с длительностью, меньшей трети периода на несущей частоте. В работе

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (договор 075-03-2023-106 от 13.01.2023).

Гамильтонов формализм для коллективных бозонных волн в кварк-глюонной плазме: рассеяние плазмонов на жесткой цветной частице*

Ю.А. Марков¹, М.А. Маркова¹, Н.Ю. Марков¹

¹ *Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Разработана гамильтонова теория для коллективных продольно-поляризованных глюонных возбуждений (плазмонов), связанных с классической высокоэнергетической пробной цветной заряженной частицей, распространяющейся через высокотемпературную глюонную плазму. Проведено обобщение скобки Ли – Пуассона на случай сплошной среды, включающей бозонную переменную нормального поля a_k^a и неабелев цветной заряд Q^a , и приведены соответствующие уравнения Гамильтона. Выписаны канонические преобразования, включающие одновременно как бозонные степени свободы мягких коллективных возбуждений, так и степени свободы жесткой тестовой частицы, связанной с ее цветным зарядом в горячей глюонной плазме. Для этих преобразований получена полная система условий каноничности. Введено понятие плотности числа плазмонов \mathcal{N}_k^{aa} , которая является нетривиальной матрицей в цветовом пространстве. Найден явный вид эффективного гамильтониана четвертого порядка, описывающего упругое рассеяние плазмона на жесткой цветной частице, и получена самосогласованная система кинетических уравнений типа Больцмана, учитывающая изменение по времени среднего значения цветного заряда жесткой частицы.

Ключевые слова: кварк-глюонная плазма, приближение жестких температурных петель, гамильтонов формализм, плазмон, кинетическое уравнение для волн.

Введение

В наших предыдущих работах [1–3] был сделан шаг вперед в построении классического гамильтонова формализма для описания нелинейных процессов взаимодействия мягких коллективных возбуждений бозе- и ферми-типов в горячей слабовзаимодействующей кварк-глюонной плазме (КГП). В этих работах были рассмотрены простейшие случаи взаимодействий, а именно взаимодействие коллективных продольно-поляризованных бесцветных глюонных возбуждений (плазмонов) и коллективных кварк-антикварковых возбуждений с аномальным соотношением между киральностью и спиральностью (плазминов) в КГП. В рамках общего гамильтонова подхода к выводу волновой теории в нелинейных средах с дисперсией [4–9] мы определили в явном виде специальные канонические преобразования вплоть до членов третьего порядка по фермионной и бозонной нормальным переменным (b_q^i, b_q^{*i}) и (a_k^a, a_k^{*a}) . Первые принимают свои значения в алгебре Грассмана. Определены системы условий каноничности, связывающие между собой высшие и низшие коэффициентные функции в подынтегральных выражениях членов разложения канонических преобразований. В силу трехволновой нераспадной природы дисперсионных соотношений для бесцветных плазминов и плазмонов канонические преобразования позволили исключить гамильтонианы третьего порядка H_3 по степеням нормальных переменных (b_q^i, b_q^{*i}) и (a_k^a, a_k^{*a}) . Исключение «несущественных» (по терминологии В.Е. Захарова [5]) гамильтонианов взаимодействия H_3 дало возможность получить новые эффективные гамильтонианы четвертого порядка \tilde{H}_4 , подынтегральные выражения которых содержат калибровочно-инвариантные амплитуды рассеяния, определяющие простейшие амплитуды рассеяния на древесном уровне: рассеяние двух плазмонов друг на друге, рассеяние плазмона на плазмоне и плазмона на плазмине.

В настоящей работе мы расширяем гамильтонов анализ динамики фермионных и бозонных возбуждений в горячей КХД-среде на мягкой импульсной шкале, выполненный в работах [1–3], на жесткий сектор возбуждений КГП-плазмы. Здесь мы сосредотачиваем свое внимание на исследо-

* Результаты получены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Аналитические и численные методы математической физики в задачах томографии, квантовой теории поля и механики жидкости и газа» (№ гос. регистрации: 12104130005-1).

УКАЗАТЕЛИ

**Указатель статей и кратких сообщений,
опубликованных в журнале
«Известия вузов. Физика»
за 2023 г.**

Выпуск 1

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Ушков В.А., Зорин Д.А. Синтез стеклокерамики Mg_4SiO_2 в среде термической плазмы	3
Бельтюков А.Л., Русанова А.И., Русанов Б.А., Сидоров В.Е., Сон Л.Д., Ладьянов В.И. Особенности политерм вязкости и плотности стеклообразующих расплавов $Al_{86}(Ni,Co)_8Tb_6$ с различным соотношением Ni/Co	9
Нурмагомедов Т.Н., Амиралиев А.Д., Магомедов Г.М., Магомедов Г.М., Цурова А.Т., Насруллаев И.Н. Влияние природы компонентов на релаксационные свойства металлоорганопластиков	16
Гончаренко И.М., Москвин П.В., Работкин С.В., Григорьев С.В., Петрикова Е.А. Алитирование поверхностей конструкционных среднеуглеродистых сталей в вакууме PVD-методами	22
Султонов Н., Акобирова А.Т., Хамрокулов Р.Б., Рахматов Б.А., Наимов У.Р., Гафуров О.В. Влияние структуры на перенос тока в пленках теллурида кадмия разной толщины	30

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Беляев Б.А., Волошин А.С., Селютин Г.Е., Говорун И.В., Галеев Р.Г. Распространение электромагнитной волны при наклонном падении на плоскопараллельную диэлектрическую пластину	36
Зарифзода А.К. Сдвиговые волны в магнитных жидкостях	45

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Арсенид галлия с включениями ферромагнитных $MnAs$ нанокластеров в качестве материала для спинтроники. Ч. 1	56
Лебедев С.М., Гефле О.С. Сегнетоэлектрические многофазные композиты на основе полилактида	67

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Нехорошев В.О., Королев Ю.Д., Ландль Н.В., Франц О.Б., Касьянов В.С. Исследование плазменных струй, получаемых на основе тлеющего разряда в потоке аргона	79
--	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Фисанов В.В. О рефракции в метаматериале с потерями и формулах Кеттелера	87
Скобелев В.В. О средних числах одинаковых (микро)объектов в их $N_S \geq 3$ возможных (пространственных) состояниях и с вероятностными переходами между ними в системе из постоянного числа этих (микро)объектов	92
Зарипов Р.Г. Изменения энтропии и информации различия Реньи при переходах между состояниями систем в расширенной парастатистике	103
Басхаев Д.Л., Галушина Т.Ю. Исследование эффективности интеграторов Гаусса – Эверхарта и Lobbie в задачах астероидной динамики	109

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Ерина М.В., Дерябин М.И. Особенности сенсibilизированной фосфоресценции нафталина в поликристаллическом растворе четыреххлористого углерода	117
Шарангович С.Н., Долгирев В.О. Исследование дифракции света на электрически управляемых многослойных неоднородных голографических ФПМ-ЖК-дифракционных структурах	122
Садовников С.А., Яковлев С.В., Романовский О.А., Кравцова Н.С., Харченко О.В. Моделирование тропосферных измерений концентрации метана самолетным лидаром дифференциального поглощения	131

**Именной указатель журнала
«Известия вузов. Физика»
за 2023 г.***

А

Абдулвагабова С.К., 3, 10
Абдуллаев С.К., 2, 4
Абубакаров А.Г., 4
Авакянц Л.П., 12
Авербух Б.Б., 5
Авербух И.Б., 5
Аврамов П.В., 2, 3
Агафонцев М.В., 4
Азаматов З.Т., 2
Акименко Н.Ю., 7, 8
Акинина М.Д., 7
Акинцов Н.С., 8
Акобиров А.Т., 1
Аксенова К.В., 7
Аксенова Ю.В., 10
Алекберов Р.И., 3
Александрова А.Г., 8
Александровский Э.К., 12
Алиева Т.Г., 6
Алиева Т.Д., 6
Алифирова В.М., 9
Алмаев А.В., 7
Аль-Майяхи Х., 2
Амирралиев А.Д., 1
Ананьева Л.Г., 4
Андрианов А.А., 7
Андрианова О.Н., 7
Андронов А.А., 5
Аникеев С.Г., 5
Анисимова М.А., 11
Антипов О.Л., 10
Арефьев К.П., 3
Артишев С.А., 10
Артишова Н.В., 5
Артищенко П.В., 2, 3
Астапенко В.А., 12
Астафуров С.В., 12
Астафурова Е.Г., 12
Ахметова О.В., 10
Ахундова Н.М., 6
Ашихмин А.Е., 11

Б

Баалбаки Х.А., 6
Бадьян А.В., 2
Базарбаев Н.Н., 2
Базарова С.Б., 4
Базыль О.К., 4
Байгонакова Г.А., 2
Бакулин А.В., 9
Баньщикова М.А., 5
Барышев М.Г., 6
Барышников С.В., 4, 12
Басалаев Ю.М., 5

Басалаева О.Г., 5
Басхаев Д.Л., 1
Батуев С.П., 2
Белибихин С.В., 2
Беллер А.В., 3
Белов Н.Н., 12
Беломятцева Е.С., 5
Белоненко М.Б., 2, 3
Бельтюков А.Л., 1
Бельчиков И.А., 8
Беляев Б.А., 1, 12
Беляева Т.А., 8
Беляков Н.Р., 11
Бергалиев Т.К., 12
Бердыбаева Ш.Т., 3, 5
Бердюгин А.И., 2
Блинкова Е.В., 8
Бобров П.П., 8
Бобуёк С., 5
Богданов А.А., 12
Богомоллов А.Р., 11
Болотов А.В., 3
Болтуева В.А., 9
Большасов Е.Н., 11
Борисова С.Д., 2
Бородин В.И., 4
Бочарникова Е.Н., 4, 10
Бугрова Т.А., 12
Булгакова М.В., 2
Буркин В.В., 2
Бурмистров Е.Р., 12
Буслович Д.Г., 12

В

Вагнер Д.В., 2, 12
Валитов Р.Р., 10
Валуйская Л.А., 12
Васильев А.Ю., 11
Васильев В.В., 12
Васильев И.П., 6
Васильев И.П., 9
Васильченко Д.Б., 12
Вахрушев Д.О., 4
Вдовин В.И., 6
Вертков А.В., 3
Вишняков А.В., 12
Власов В.А., 9
Власов Д.В., 7, 9, 10
Власов Е.В., 10
Вовнова И.Г., 8, 12
Водянкина О.В., 2, 12
Воеводин В.И., 10
Войтенко Д.С., 10
Войцеховский А.В., 7, 8,
9, 10
Волокитин О.Г., 1
Волошин А.С., 1

Вольф Э.Л., 3
Ворожцов А.Б., 3, 8, 12
Ву Д.В., 7
Вшивцев М.А., 7
Выродова А.В., 8

Г

Гаврилов А.А., 11
Гаврилова Т.Е., 11*
Гадиров Р.М., 2
Гаенко О.И., 12
Галеев Р.Г., 1
Галушина Т.Ю., 1
Гафуров О.В., 1
Гейман В.Г., 3
Генин Д.Е., 10
Гефле О.С., 1, 2
Гладков С.О., 3, 7
Глухов И.А., 9
Говорун И.В., 1, 12
Годжаев М.Ш., 2, 4
Годжаева М.В., 6
Голубовская А.Г., 2
Гончаренко И.М., 1
Горбатенко В.В., 12
Горина В.З., 11
Горн Д.И., 9, 10
Горончко В.А., 1, 6, 10
Горшков Д.В., 6
Грабко Г.И., 6
Грабченко М.В., 12
Гребенюк О.В., 9
Грибенюков А.И., 10
Григорьев Д.В., 9, 10
Григорьев С.В., 1
Гриняев К.В., 5*, 7
Гриняев Ю.В., 9
Громов В.Е., 7, 8
Грунская Л.В., 2
Грязнов А.С., 12
Гуанхуа Ч., 11
Гузей Д.В., 11
Гулаева А.К., 2, 4
Гулгенов Ч.Ж., 4
Гурбанова Н.Н., 6
Гурулев А.В., 4
Гусева А.В., 12
Гусейнов Т.Х., 5
Гутаковский А.К., 6
Гынгазов А.С., 6
Гынгазов С.А., 6, 9
Гюнтер В.Э., 5

Д

Давыдов В.Н., 2
Давыдов Д.А., 11
Данейко О.И., 4

Дворецкий С.А., 9
Девицкий О.В., 7
Дегтяренко К.М., 5
Дейчули М.П., 6
Делов М.И., 11
Демкин В.П., 3, 7, 9
Демкин О.В., 3
Дерябин А.С., 4
Дерябин М.И., 1
Дзядх С.М., 9, 10
Диб Х., 8
Дирко В.В., 7, 8
Дитенберг И.А., 5*, 7
Долгирев В.О., 1
Долгих В.Д., 11
Дорожкин К.В., 2
Дорофеев И.О., 5
Доценко О.А., 5, 12
Дубовиков К.М., 2
Дудин А.Н., 7
Дунаевский Г.Е., 5
Дьячковский А.С., 2, 6

Е

Евсеев Н.С., 8
Егоров Ю.П., 7
Егорова И.В., 4
Емельянов Е.В., 5
Емельянов Ф.С., 7
Еремин А.В., 12
Ерзакова Н.Н., 7
Ерина М.В., 1
Есбергенев Д.М., 5
Есин М.Ю., 4, 5
Есин М.Ю., 5

Ж

Жаховский В.В., 11
Жерлицын А.А., 4
Жигарев В.А., 11
Жуков И.А., 8
Журавлев В.А., 12

З

Завадовский К.В., 3
Загибалова Е.А., 12
Загуляев Д.В., 7
Задорожный О.Ф., 2
Зайцев В.А., 7, 9
Закиров Е.Р., 6
Зарипов Р.Г., 1, 6, 10
Зарифзода А.К., 1, 5
Захарян Р.А., 3
Зеева А.А., 12
Зеленова М.А., 10
Землянов А.А., 9

* Более одной статьи в номере.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 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 19.12.2023. Выпуск в свет 28.12.2023. Заказ № 5722.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 20.93. Уч.-изд. л. 23.44. Тираж 50 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

