

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

12·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Декабрь, 2024

№ 12 (805)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ
ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА
ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Шеремет М.А., проф. (гл. редактор), Томск, Россия
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
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
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 ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Трофимов М.С., Щербаков И.Д. Динамика формирования импульсов дырочной составляющей фототока в сенсорах ионизирующих излучений на основе арсенида галлия, компенсированного хромом	7
Конради Д.С., Средин В.Г. Оценка влияния внеполевой засветки на функционирование оптико-электронных систем на основе полупроводниковых матричных фотоприемников инфракрасного диапазона	16
Тимофеев В.А., Скворцов И.В., Машанов В.И., Перевалов Т.В., Исламов Д.Р., Азаров И.А., Ярошевич А.С. Изучение спектральных зависимостей показателя поглощения слоев GeSn и GeSiSn различного состава, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии	22

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Чайковская О.Н., Базыль О.К., Бочарникова Е.Н., Безлепкина Н.П., Майер Г.В. Спектрально-люминесцентные свойства и природа электронно-возбужденных состояний парацетамола в воде	31
Соснин Э.А., Сорокин Д.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Печеницин Д.С. О возможном механизме буферного защелачивания природных вод, подвергнутых действию импульсного высоковольтного разряда	40
Корюкина Е.В. Моделирование профилей линий спектров благородных газов, возбуждаемых терагерцовыми электрическими полями	46
Курцевич А.Е., Валиев Р.Р., Черепанов В.Н. Внутренняя конверсия между двумя возбужденными электронными состояниями в производных порфирина	56
Макашев Д.Р., Распопин Г.К., Паулиш А.Г., Кистенев Ю.В. Система для исследования пространственного распределения ТГц-излучения	62

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Дымов Г.А., Мироньчев А.С., Запасной А.С., Горст А.В. Характеристические моды в теории плоских и объемных сверхширокополосных антенн	70
Багуля А.В., Гришин В.М., Иванченко В.Н., Чалый Н.А. Новая Geant4 база данных по адронным сечениям нейтронов и легких ионов	80
Бернгардт А.Е., Ерофеев Д.В., Борщ В.Н. Разработка L2-концентратора для эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA	85

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Порязов В.А., Крайнов Д.А., Глотов О.Г. Моделирование горения конденсированных высокоэнергетических материалов, содержащих порошкообразный алюминий. II. Модель	91
Гареев Т.И., Богомолова А.И., Горкуша А.С., Суляева В.С., Зайцев О.В., Нерушев О.А., Сорокин Д.В., Смовж Д.В. Синтез и свойства композита на основе CVD-графена и оксида олова, полученного методом магнетронного распыления	99
Яковенко С.Н. Управление теплопереносом в импактной струе с решеткой на входе	109
Колесова А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А. Исследование эффективности охлаждения криволинейной поверхности при сверхзвуковом и дозвуковом течении основного потока	117
Дектерев Ар.А., Сентябов А.В., Дектерев А.А., Дектерев Д.А. Влияние геометрических особенностей модели циклоидального ротора на точность расчета тягово-энергетических характеристик	125
Елагин И.А., Ягодин Г.С., Чирков В.А. Особенности электрокоалесценции незаряженной капли со слоем воды в переменном электрическом поле	132
Архипов В.А., Басалаев С.А., Костюшин К.В., Лобода Е.Л., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Усанина А.С. Моделирование сброса жидкого хладагента при авиационном тушении пожаров	140
Кудряшова О.Б., Грузнов В.М., Соколов С.Д., Ворожцов А.Б., Михайлов Ю.М. Математическое моделирование в задаче обнаружения паров взрывчатых веществ от источника в почве	150
Дубкова Я.А., Ткачев Д.А., Верхошанский Я.Ю., Бельчиков И.А., Жуков А.С., Жукова Т.В. Твердые горючие материалы с металлическими добавками, полученные методом 3D-печати	161

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Локтионова И.В., Кузьменко А.П., Абакумов П.В. Наноструктурирование ленточных пленок нитрида бора	171
Абдульменова Е.В., Буякова С.П. Сорбция и десорбция водорода порошком Ti-Ni, легированным титаном	179

Соловьева Ю.В., Вовнова И.Г., Липатникова Я.Д., Геттингер М.В., Пантюхова О.Д. EBSD-исследование высокотемпературной макролокализации деформации монокристаллов Ni ₃ Ge в условиях ползучести	186
Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Куксгаузен Д.А., Выродова А.В., Сараева А.А. ГЦК↔ГПУ-мартенситное превращение и эффект памяти формы в монокристаллах CrFeMnCoNi высокоэнтропийного сплава при твердо-растворном упрочнении атомами углерода.....	193
Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Влияние интенсивной пластической деформации на зеренную структуру и фазовый состав технически чистой УМЗ-меди.....	201

УКАЗАТЕЛИ

Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика» за 2024 г.	209
Именной указатель журнала «Известия вузов. Физика» за 2024 г.	217

CONTENTS

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Trofimov M.S., Shcherbakov I.D. Dynamics of pulse formation of the hole component of the photocurrent in ionizing radiation sensors based on chromium-compensated gallium arsenide.....	7
Konradi D.S., Sredin V.G. Assessment of the influence of out-of-field illumination on the functioning of optoelectronic systems based on semiconductor matrix photodetectors of the infrared range.....	16
Timofeev V.A., Skvortsov I.V., Mashanov V.I., Perevalov T.V., Islamov D.R., Azarov I.A., Yaroshevich A.S. Study of spectral dependences of the absorption coefficient of GeSn and GeSiSn layers of various compositions obtained by molecular beam epitaxy.....	22

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Tchaikovskaya O.N., Bazyl O.K., Bocharnikova E.N., Bezlepina N.P., Mayer G.V. Absorption and luminescence spectra and nature of electronically excited states of paracetamol in water.....	31
Sosnin E.A., Sorokin D.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Pechenitsin D.S. On the possible mechanism of buffer alkalization of natural waters exposed to pulsed high-voltage discharge.....	40
Koryukina E.V. Modeling of line profiles of rare gas spectra excited by terahertz electric fields.....	46
Kurtsevich A.E., Valiyev R.R., Cherepanov V.N. Internal conversion between S ₂ and S ₁ electronic states in porphyrin derivatives.....	56
Makashev D.R., Raspopin G.K., Paulish A.G., Kistenev Yu.V. A system for studying the spatial distribution of THz radiation.....	62

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Belichenko V.P., Buyanov Yu.I., Dymov G.A., Mironchev A.S., Zapasnoy A.S., Gorst A.V. Characteristic modes in the theory of planar and three dimensional ultrawideband antennas.....	70
Bagulya A.V., Grichine V.M., Ivantchenko V.N., Chalyi N.A. New Geant4 cross sections dataset for neutrons and light ions.....	80
Berngardt A.E., Erofeev D.V., Borshch V.N. Development of an L2 hub for the SPD experiment at the NICA accelerator complex.....	85

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Poryazov V.A., Krainov D.A., Glotov O.G. Simulation of combustion of condensed high-energy materials containing powdered aluminum. II. Model.....	91
Gareev T.I., Bogomolova A.I., Gorkusha A.S., Sulyaeva V.S., Zaitsev O.V., Nerushev O.A., Sorokin D.V., Smovzh D.V. Synthesis and characterisation of composite based on CVD-graphene and tin oxide obtained by magnetron sputtering.....	99
Yakovenko S.N. Heat transfer control in an impinging jet with grid at the inlet.....	109
Kolesova A.A., Veretennikov S.V., Evdokimov O.A. Investigation of cooling efficiency of a curved surface at supersonic and subsonic flow of the main stream.....	117
Dektere Ar.A., Sentaybov A.V., Dektere A.A., Dektere D.A. Influence of geometric features of the cycloidal rotor model on the accuracy of calculation of thrust-energy characteristics.....	125
Elagin I.A., Yagodin G.S., Chirkov V.A. Features of electrocoalescence of an uncharged droplet with a water layer under the action of the alternating electric field.....	132
Arkipov V.A., Basalaev S.A., Kostyushin K.V., Loboda E.L., Matvienko O.V., Perfil'eva K.G., Romandin V.I., Usanina A.S. Modeling of the liquid coolant discharge at the aviation fire extinguishing.....	140
Kudryashova O.B., Gruznov V.M., Sokolov S.D., Vorozhtsov A.B., Mikhailov Yu.M. Mathematical modeling in the problem of detecting explosive vapors from sources in the soil.....	150
Dubkova Ya.A., Tkachev D.A., Verkhoshanskiy Ya.Yu., Belchikov I.A., Zhukov A.S., Zhukova T.V. Printed solid combustible materials with metal additives.....	161

CONDENSED-STATE PHYSICS

Loktionova I.V., Kuzmenko A.P., Abakumov P.V. Nanostructuring of Langmuir boron nitride films.....	171
Abdulmenova E.V., Buyakova S.P. Hydrogen sorption and desorption by Ti–Ni powder alloyed with titanium.....	179
Solov'eva Yu.V., Vovnova I.G., Lipatnikova Ya.D., Gettinger M.V., Pantyukhova O.D. EBSD study of high-temperature strain macro-localization of Ni ₃ Ge single crystals under creep.....	186

Kireeva I.V., Chumlyakov Y.I., Kuksgauzen D.A., Vyrodova A.V., Saraeva A.A. FCC \leftrightarrow HCP martensitic transformation and shape memory effect of the CrFeMnCoNi high-entropy alloy single crystals in solid solution strengthening by carbon atoms	193
Popova N.A., Nikonenko E.L., Solov'eva Yu.V., Starenchenko V.A. Influence of severe plastic deformation on the grain structure and phase composition of technically pure UFG-copper.....	201

POINTERS

Index of articles and brief communications published in the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2024.....	209
Name index of the journal «Izvestiya vuzov. Fizika» for 2024.....	217

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592.3

DOI: 10.17223/00213411/67/12/1

Динамика формирования импульсов дырочной составляющей фототока в сенсорах ионизирующих излучений на основе арсенида галлия, компенсированного хромом*М.С. Трофимов¹, И.Д. Щербаков¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования транспорта дырок в сенсорах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом (HR-GaAs:Cr) при помощи техники переходного тока и численного моделирования фотоотклика HR-GaAs:Cr-сенсора на единичный импульс инфракрасного излучения. Объектом исследований являлись HR-GaAs:Cr-сенсоры с сетчатым металлическим контактом, на который был подан положительный потенциал. Установлено, что при облучении сенсора со стороны сетчатого анода наблюдается дрейф электронов в горизонтальном направлении к полоскам сенсора, приводящий к формированию импульса фототока в электрической цепи длительностью менее 1 нс. Установлено, что наблюдаемые участки экспоненциального спада фототока на заднем фронте импульсов обусловлены дрейфом дырок к катоду сенсора, сопровождающегося захватом на отрицательно заряженные центры хрома. На основе полученных результатов определено время жизни дырок в исследуемых образцах.

Ключевые слова: HR-GaAs:Cr, полупроводниковый детектор, сенсор, импульс фототока, время жизни.

Введение

Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений на сегодняшний день широко применяются в различных областях науки и техники: физика высоких энергий, ядерная физика, медицина и материаловедение. Одним из основных элементов таких детекторов являются полупроводниковые сенсоры, преобразующие энергию излучения в электрический сигнал. Тенденция повышения энергии регистрируемых излучений накладывает ряд требований на полупроводниковый материал сенсора. Материал должен обладать высокими значениями плотности, атомного номера, удельного сопротивления, а также иметь высокую радиационную стойкость. Этим условиям удовлетворяют полупроводники сложного состава, в том числе арсенид галлия (GaAs). Группой ученых из Томского государственного университета (ТГУ) разработана технология получения арсенида галлия детекторного качества путем легирования GaAs *n*-типа проводимости хромом в процессе высокотемпературной диффузии (HR-GaAs:Cr, где HR – high resistivity) [1]. Спектрометрические и фотоэлектрические характеристики изготавливаемых в ТГУ HR-GaAs:Cr-сенсоров обеспечивают высокое качество проводимых исследований в различных областях науки и техники [2–10].

Известно, что процесс транспорта неравновесных носителей заряда в полупроводниковых сенсорах определяется дрейфовой длиной, являющейся произведением подвижности носителей заряда, их времени жизни и напряженности электрического поля в активной области сенсора. Одним из основных инструментов для исследований данных характеристик является техника переходного тока (Transient Current Technique (ТСТ)) [11–16]. В работах [14–16] приведены результаты исследований транспортных характеристик HR-GaAs:Cr-сенсоров с использованием ТСТ. Работы [14, 16] посвящены исследованию дрейфовой подвижности и эффективности сбора заряда электронов. В работе [15] проведено исследование динамики формирования электронных импульсов фототока путем численного анализа формы пространственного заряда и профиля напряженности электрического поля в активной области сенсора.

В ходе анализа литературных данных было отмечено, что в данных работах сенсоры облучались только со стороны контакта, находящегося под отрицательным потенциалом (со стороны катода), с целью определения характеристик транспорта электронов и профиля напряженности поля.

* Исследование выполнено при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

Оценка влияния внеполевой засветки на функционирование оптико-электронных систем на основе полупроводниковых матричных фотоприемников инфракрасного диапазона

Д.С. Конради¹, В.Г. Средин¹

¹ *Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого,
Московская область, г. Балашиха, Россия*

Проведена оценка влияния внеполевой засветки на характеристики оптоэлектронных систем, использующих матричные полупроводниковые фотоприемные устройства, на основе известных их моделей.

Ключевые слова: внеполевая засветка, чувствительный элемент, матричное фотоприемное устройство.

Введение

Полупроводниковые матричные фотоприемные устройства (МФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона получили широкое распространение в разнообразных оптоэлектронных системах (ОЭС), предназначенных как для многоканальных комплексов космического мониторинга и дистанционного зондирования поверхности Земли, так и для бытовых приборов и устройств. В связи со своим предназначением значительная часть указанных ОЭС должна сохранять работоспособность в широком интервале значений параметров, характеризующих состояние среды, в которой они функционируют, включая ее температуру, интенсивность потоков регистрируемого излучения как от естественных, так и от специальных источников. Последней проблеме посвящен ряд исследований. В большинстве из них анализировалось влияние лазерного излучения на параметры полупроводниковых матричных фотоприемников (МФП) при условии, что источник был расположен в поле зрения оптической системы [1–4]. Основой рассмотрения в работах для фотоприемников ИК-диапазона служила, как правило, модель, основанная на решении уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями, в которой эффект засветки оценивался по изменению температуры фоточувствительной площадки приемника [5–7]. В работах [8, 9] было показано, что и внеполевая засветка, когда источник излучения расположен вне поля зрения оптической системы ОЭС и последняя не формирует по этой причине изображения источника в фокальной плоскости, может вызывать изменение обнаружительных характеристик системы. К этому приводит реакция чувствительных элементов (ЧЭ) матрицы на рассеянное на оптических и конструктивных деталях объектива излучение, которое наравне с фоновым вызывает рост шумов в тракте обработки оптического сигнала. Отметим, что работы [8, 9] носили полуэмпирический характер, в них было показано, что плотность вероятности распределения сигнала лазерной помехи, формируемой МФПУ в условиях внеполевой засветки, может быть представлена двухпараметрической функцией, причем один из этих параметров определяется на основании анализа экспериментальных результатов, полученных с помощью использованного авторами ФПУ, поэтому значение этого параметра зависит от конструкции ОЭС. Предложенные авторами [8, 9] статистические характеристики лазерной помехи позволили рассчитать вероятности ложной тревоги или пропуска цели при регистрации с помощью ОЭС квазиточечного объекта на фоне внеполевой засветки.

В настоящей работе предпринимается попытка оценить влияние внеполевой засветки на функционирование ОЭС, построенной на основе МФП ИК-диапазона, с помощью аналитической модели расчета параметров МФПУ [10]. При этом процедуры обработки сигнала в системе регистрации ФПУ, например, применение режима временной задержки и накопления заряда, позволяющие снизить влияние шумов, в настоящей работе не рассматриваются.

Изучение спектральных зависимостей показателя поглощения слоев GeSn и GeSiSn различного состава, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии*

В.А. Тимофеев¹, И.В. Скворцов¹, В.И. Машанов¹, Т.В. Перевалов¹,
Д.Р. Исламов¹, И.А. Азаров^{1,2}, А.С. Ярошевич¹

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Проводятся исследования показателя поглощения в ближнем ИК-диапазоне слоев GeSn и GeSiSn различных составов с содержанием кремния до 63% и олова до 14%, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Изучены две серии образцов, полученных на наноструктурированной фасетированной поверхности и на поверхности Si(100). Установлено, что на телекоммуникационной длине волны 1.55 мкм величина показателя поглощения GeSiSn превышает значение для Ge более чем в 4 раза. Определены значения ширины запрещенной зоны GeSiSn исследуемых составов. Получено хорошее количественное согласие расчетных и экспериментальных значений ширины запрещенной зоны и качественное согласие спектров оптического поглощения.

Ключевые слова: показатель поглощения, молекулярно-лучевая эпитаксия, наноструктурированная фасетированная поверхность, теория функционала плотности.

Введение

Для создания устройств фотоники, работающих в ближнем (1.1–3 мкм) и среднем (3–5 мкм) инфракрасном (ИК) диапазонах и совместимых с современной кремниевой технологией изготовления интегральных микросхем, требуется разработка полупроводниковых материалов, состоящих из элементов IV группы, таких как Si, Ge, Sn [1]. Известно, что атомы Si и Sn могут встраиваться в матрицу Ge, так что возможно получать двойные и тройные соединения с шириной запрещенной зоны, варьируемой в широком диапазоне, в том числе прямозонные [2, 3]. Тройные соединения GeSiSn обладают повышенной термической стабильностью по сравнению с соединениями GeSn, а также позволяют настраивать ширину запрещенной зоны и параметр решетки независимо друг от друга [4, 5]. Совместное использование твердых растворов GeSn и GeSiSn представляет интерес с точки зрения создания гетеропереходов как I, так и II типа. В настоящее время в литературе представлены макеты фотодетекторов [6, 7], светодиодов [8], а также лазеров с оптической [9] и электрической накачкой [10] на основе GeSn и GeSiSn. На пути перехода к созданию эффективных рабочих устройств стоит ряд задач, среди которых изучение структурных и оптических свойств соединений GeSn и GeSiSn различного состава. В данной области существенно больше исследований посвящено соединениям GeSn. Показано, что даже малая концентрация Sn увеличивает показатель поглощения GeSn на несколько порядков в ближнем ИК-диапазоне по сравнению с объемным Ge, при этом край поглощения значительно смещается в сторону больших длин волн: от 1.6 мкм для чистого Ge до 2.0 и 2.25 мкм для слоев Ge_{0.955}Sn_{0.045} и Ge_{0.915}Sn_{0.085} соответственно [11]. Продемонстрирован *p-i-n*-фотодиод на основе Ge_{0.98}Sn_{0.02} с длинноволновой границей чувствительности 1.68 мкм, что открывает возможность использования таких структур во всем оптическом телекоммуникационном диапазоне длин волн (от 1.26 до 1.68 мкм) [12]. Показано поглощение в среднем ИК-диапазоне при дальнейшем увеличении концентрации Sn и уменьшении деформаций сжатия в слоях GeSn [13, 14]. Длинноволновая граница чувствительности фотодетектора достигает 3.65 мкм для слоев GeSn с содержанием Sn более 20% [13]. За счет минимизации деформаций в фотопроводящей мембране на основе Ge_{0.83}Sn_{0.17} достигнута длинноволновая граница чувствительности 4.5 мкм [14]. При увеличении содержания Sn до ~30% край поглощения смещается до 8 мкм [15, 16].

Для тройных соединений GeSiSn проведено значительно меньше исследований оптических свойств, чем для GeSn. Изучены спектральные зависимости показателя поглощения слоев GeSiSn

* Работа поддержана госзаданием № FWGW-2024-0001 «Физико-технологические основы создания гетероструктур на базе элементов IV группы, совместимых с современной кремниевой технологией, для устройств фотоники». Квантово-химическое моделирование осуществлялось на вычислительном кластере ИВЦ НГУ.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 539.2

DOI: 10.17223/00213411/67/12/4

Спектрально-люминесцентные свойства и природа электронно-возбужденных состояний парацетамола в воде*О.Н. Чайковская^{1,2}, О.К. Базыль¹, Е.Н. Бочарникова^{1,2}, Н.П. Безлепкина^{1,2}, Г.В. Майер¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Представлено экспериментальное и теоретическое исследование электронных спектров парацетамола в воде. Изучены два изомера молекулы. Квантово-химическая интерпретация методом ЧПДП спектров поглощения и флуоресценции парацетамола выполнена с использованием усредненных и оптимизированных геометрических параметров. Показано, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными спектрами. Выявлено два центра взаимодействия парацетамола с водой, что позволило обоснованно построить геометрию комплексов с Н-связями молекулы парацетамола с водой.

Ключевые слова: парацетамол, электронный спектр поглощения, спектр флуоресценции, квантово-химические расчеты.

Введение

Парацетамол (*N*-(4-гидроксифенил)ацетамид) – один из самых распространенных анальгетиков и антипиретиков в мире. Данный препарат доступен без рецепта и применяется для облегчения таких симптомов, как повышенная температура, легкая или умеренная боль, лихорадка и воспаление. Он выпускается в различных формах, включая таблетки, капсулы и жидкости. Также парацетамол входит в состав других лекарственных препаратов в сочетании с различными фармацевтическими компонентами [1]. Парацетамол используется в клинической практике уже более века, однако точный механизм его действия не известен, что вызывает большой интерес у исследователей. До недавнего времени было общепринято, что он ингибирует активность фермента циклооксигеназы посредством метаболизма за счет пероксидазной функции этих изоферментов [2]. Это приводит к ингибированию образования феноксильного радикала из критического остатка тирозина, необходимого для циклооксигеназной активности и синтеза простагландинов [2]. Исследования, которые проводились за последние несколько лет, ставят под сомнение данное объяснение анальгезирующего действия парацетамола [3, 4]. С увеличением количества данных стало более очевидно, что уменьшение болевой чувствительности парацетамолом имеет несколько путей и опосредовано образованием биоактивного метаболита *N*-арахидоноилфеноламина в центральной нервной системе [4].

Для лучшего понимания механизма взаимодействия парацетамола и создания его производных большей эффективности необходимо изучить электронную структуру изолированной молекулы парацетамола и его комплексов с водой на молекулярном уровне. Авторы работы [5] исследовали электронную структуру изолированной молекулы парацетамола с помощью вычислительных методов и сопоставили результаты с валентными и остовными фотоэлектронными спектрами. Показано, что парацетамол может иметь десятки конформеров, что связано с наличием в структуре молекулы трех одиночных связей, допускающих изменение относительного положения фрагментов молекулы, связанных этими связями. В экспериментальных и теоретических спектрах парацетамола видны два отчетливых пика и три второстепенных пика или плеча [5, 6]. В физиологических условиях лекарственные препараты взаимодействуют с растворителем, и наиболее часто им является вода, поэтому важно знать, как молекула действующего вещества взаимодействует с водой.

Цель данной работы – исследование природы электронно-возбужденных состояний и интерпретация спектров поглощения и флуоресценции водного раствора парацетамола с использованием методов квантовой химии.

* Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-19-20031.

О возможном механизме буферного защелачивания природных вод, подвергнутых действию импульсного высоковольтного разряда*

Э.А. Соснин^{1,2}, Д.А. Сорокин^{1,2}, В.А. Панарин¹, В.С. Скакун¹, Д.С. Печеницин¹

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

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

Установлено, что плазменная обработка различных водно-солевых растворов природного происхождения, осуществляемая с помощью импульсного высоковольтного разряда в пузырьках воздуха, дает такой временной ход водородного показателя плазменно-активированной воды, для которого, в отличие от разряда в дистиллированной воде, характерны: 2–12% рост рН на первом этапе, относительно стабильная величина рН на втором этапе и быстрое падение рН на третьем этапе. Временной ход рН на третьем этапе является аналогичным быстрому спаду, характеризующему действие плазмы на дистиллированную воду. Второй этап предложено называть «буферным» плато. Предложена гипотеза о том, что его длительность, как и степень защелачивания, на первом этапе зависят от концентрации нерастворимых солей в исходной природной воде.

Ключевые слова: активированная плазмой вода, буферное защелачивание, водородный показатель, импульсный разряд, низкотемпературная плазма, природная вода.

Введение

Низкотемпературная плазма является мощным инструментом для решения различных задач, поскольку обеспечивает действие сразу нескольких физических и химических факторов на объекты воздействия. Варьируя параметры разряда и среды, в которых формируется плазма, можно «настроить» ее параметры так, чтобы обеспечить наилучшее решение той или иной задачи. Одним из направлений интенсивных исследований является изучение механизмов взаимодействия плазмы с жидкостью [1, 2]. Здесь осуществляются как фундаментальные исследования, так и прикладные, основная идея которых состоит в получении такого режима взаимодействия, который обеспечивал бы синтез наночастиц [3], сохранение пищевых продуктов [4, 5], обеззараживание и очистку водных растворов [6, 7] или ускорение развития сельскохозяйственных культур [8, 9]. Полученные в результате взаимодействия жидкие среды называются водами или средами, активированными плазмой или АПВ (от англ. plasma activated water и plasma activated media) [10].

Считается общеизвестным, что действие плазмы на воду, за счет реакций, происходящих между водой и химическими соединениями, образующимися в плазме, приводит к резкому снижению рН среды с образованием в ней сильных кислот. Этот процесс сопряжен с образованием перекиси водорода, азотной и пероксоазотной кислот [11]. Далее этот факт был многократно подтвержден. Однако в исследовании [12] была обнаружена аномалия: действие импульсного разряда на родниковую воду, в отличие от обработки дистиллированной воды, приводила к росту показателя рН. С точки зрения фундаментальной науки интересно, насколько широко проявляет себя найденная аномалия, является ли она частным случаем? Далее важно разобраться с тем, что происходит с физическими и химическими параметрами воды при ее защелачивании. Это множество вопросов нельзя изучить в рамках одного исследования, поэтому в данной работе мы сосредоточимся лишь на одном из аспектов и определим, насколько широко описанное явление проявляет себя.

Цель работы – установить особенности поведения водородного показателя в различных водных средах природного происхождения, подвергнутых действию импульсного высоковольтного разряда, и сформулировать гипотезу, которая их объясняет.

Экспериментальная установка и методики

Плазменной обработке подвергали дистиллированную воду (ООО «Масла и смазки», Россия, образец № 1) с исходной проводимостью 0.2 мкСм/см и рН = 5.65, а также воду (водно-солевые растворы) натурального происхождения из различных источников, взятую для анализов весной-летом 2023 г.: водопроводная вода (образец № 2); родниковая вода (образец № 3); речная вода из р. Томь (образец № 4); речная вода из р. Обь (образец № 5).

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

Моделирование профилей линий спектров благородных газов, возбуждаемых терагерцовыми электрическими полями*

Е.В. Корюкина¹

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

Развит унифицированный подход для расчета профилей спектральных линий атомов в переменном электрическом поле, основанный на диагонализации матрицы энергии атома в поле. Для расчета штарковского профиля спектральной линии предложена формула, в которой ширина профиля содержит зависимость от параметров электрического поля в явном виде. Алгоритм метода реализован в пакете компьютерных программ StarkD, написанном на FORTRAN и Maple. В рамках предложенного подхода проведено компьютерное моделирование профилей спектральных линий атомов He, Ne и Ar в терагерцовых электрических полях линейной поляризации. Результаты моделирования позволили проанализировать причины сужения/уширения спектральных линий, увеличения/уменьшения интенсивностей спектральных линий, а также смены направления сдвига атомных спектральных линий при изменении частоты электрического поля в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: переменное электрическое поле, моделирование профилей атомных спектральных линий.

Введение

Изучение влияния переменных электрических полей на спектры излучения атомов является актуальной задачей теоретической атомной спектроскопии, поскольку методы атомной спектроскопии широко используются для диагностики процессов, протекающих в лабораторной и космической плазме. Особый интерес представляют теоретические расчеты профилей линий в спектрах излучения атомов, так как анализ этих профилей линий позволяет оценить температуру и плотность плазмы. Температура плазмы определяется из интенсивностей спектральных линий, или из доплеровского уширения спектральных линий ([1] и ссылки в ней). Плотность электронов в плазме оценивается из штарковских профилей спектральных линий [2]. В случае переменного электрического поля достаточно точная диагностика плотности электронов в плазме возможна только на основании штарковских ширин линий водородного спектра или линий ионизованного гелия [1, 3, 4]. Если использование этих линий невозможно, проблема получения достоверной оценки плотности электронов из спектров многоэлектронных атомов сильно усложняется, поскольку при расчете штарковских профилей спектральных линий необходимо знание константы уширения C_4 при квадратичном эффекте Штарка. Расчет константы сопряжен со значительными трудностями, вследствие чего для ее определения предлагаются различные формулы. В частности, в ([4] и ссылки в ней) предложена формула расчета C_4 через силу осциллятора для данной линии, но эта формула дает большую погрешность. Уточнение формулы за счет учета большего числа переходов и поправки на неадиабатичность столкновений приводит к значительному усложнению расчетов [4, 5]. В работе [6] для расчета константы C_4 была предложена формула, которая позволяла оценить данную константу через сдвиг спектральной линии при фиксированной напряженности электрического поля 100 кВ/см. Достоинством этой формулы является простота расчета и неплохое согласие рассчитанных с ней штарковских ширин с экспериментальными данными для электрических полей порядка 100 кВ/см, однако зависимость константы штарковского уширения от частоты электрического поля не рассматривается.

Данная работа посвящена моделированию спектров благородных газов в переменных электрических полях терагерцового диапазона. Интерес именно к этому диапазону изменения частоты электрического поля вызван тем, что в терагерцовой области атомы благородных газов имеют множество близко лежащих резонансов. Моделирование профилей линий в спектрах излучения атомов в переменном электрическом поле проводится в рамках унифицированного теоретического подхода, свободного от ограничений теории возмущений и справедливого в широкой области изменения частоты и напряженности электрического поля. Для расчета константы уширения C_4 при

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

Внутренняя конверсия между двумя возбужденными электронными состояниями в производных порфирина*

А.Е. Курцевич¹, Р.Р. Валиев¹, В.Н. Черепанов¹

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

Рассмотрено влияние заместителей (этоксикарбонил, мезитил, бензилоксикарбонил, 2,4,5,7-тетраметилнафтил-1 и N-бензилформиламил) в серии производных порфирина на константу скорости внутренней конверсии k_{IC} между возбужденными электронными синглетными состояниями S1 и S2. Показано, что k_{IC} возрастают от $1.17 \cdot 10^8$ для свободного порфирина до $1.8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ при наличии заместителей. При этом заместители в основном влияют на величину матричного элемента оператора неадиабатичности, в то время как энергетический зазор между состояниями S2 и S1 остается практически постоянным. Вместе с тем полученный вклад от неадиабатического смешивания состояний S2 и S1 не превышает 2%, и, таким образом, при моделировании фотофизических свойств рассмотренных соединений допустимо использование адиабатического приближения.

Ключевые слова: порфирины, внутренняя конверсия, NACME, возбужденные электронные состояния, квантово-химическое моделирование.

Введение

Благодаря своей термической стабильности, большой сопряженной плоской структуре и сильному поглощению в УФ-видимой и ближней ИК-областях спектра порфирины находят широкое применение в органической электронике в качестве материалов для фотовольтаических ячеек [1–5] и фотосенсибилизаторов для применения в фотодинамической терапии [6–10]. Поэтому в настоящее время продолжают активно вестись работы по изучению фотофизики свободного порфирина и его производных [11–14]. Хорошо известно, что свободный порфирин (H_2P) имеет два слабозапрещенных электронных перехода $S_0 \rightarrow S_1$ и $S_0 \rightarrow S_2$, которые образуют две полосы Q_x и Q_y в видимом диапазоне, а также два разрешенных электронных перехода, формирующих интенсивную В-полосу (полоса Soret) в ультрафиолетовом диапазоне [15].

Несмотря на то, что электронные состояния S1 и S2 свободного порфирина расположены достаточно близко ($E_{S_2, S_1} = 1820 \text{ см}^{-1}$, см. таблицу), неадиабатическое взаимодействие этих состояний мало [16]. Поэтому электронные спектры поглощения и испускания порфирина рассчитываются в адиабатическом приближении. Однако недавно в работе [17] было показано, что при введении заместителей определенного класса для модифицированного H_2P (далее, **123Ph**, цифрами обозначены заместители, рис. 1) внутренняя конверсия между состояниями S1 и S2 происходит быстрее, чем для H_2P . В работе [17] наблюдался (60 ± 10) фс процесс внутренней конверсии для переходов $S_2 \rightarrow S_1$, в то время как для H_2P этот процесс более длительный (200–150 фс) [18–20]. К сожалению, в этой работе не были проведены расчеты и анализ значений констант скорости внутренней конверсии k_{IC} порфирина в зависимости от заместителей.

В данной работе рассчитываются k_{IC} для серии производных порфиринов с целью определения влияния заместителей на эту величину. В рамках X–H-модели k_{IC} можно записать так [16, 21–24]:

$$k_{IC} = 1.6 \cdot 10^9 \langle \psi_{s_2} | \Lambda | \psi_{s_1} \rangle^2,$$

где квадрат модуля матричного элемента оператора неадиабатического взаимодействия Λ имеет вид

$$\langle \psi_{s_2} | \Lambda | \psi_{s_1} \rangle = \left[\sum_{\alpha=1}^{N_{XH}} P_{\alpha}^2 \right] \frac{N_{XH} \cdot 6.25 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{E_{S_2, S_1}}{2.17}}}{E_{S_2, S_1}^2}.$$

Здесь $P_{\alpha}^2 = 0.01 \sum_{i,j,a,b} \Xi_{ia}^{S_1} \Xi_{jb}^{S_2} \langle i \rightarrow a | j \rightarrow b \rangle$ – электронный множитель; $\Xi_{ia}^{S_1}$ и $\Xi_{jb}^{S_2}$ – коэффициенты конфигурационного взаимодействия; $|i \rightarrow a\rangle$ и $|j \rightarrow b\rangle$ – детерминанты Слейтера; N_{XH} – число ак-

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

Система для исследования пространственного распределения ТГц-излучения*Д.Р. Макашев¹, Г.К. Распопин¹, А.Г. Паулиш^{2,3}, Ю.В. Кистенев¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирский филиал – конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, г. Новосибирск, Россия*³ *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрен метод исследования пространственного распределения пучка терагерцового (ТГц) излучения с использованием разработанной системы 2D-сканирования оптических пучков на основе пиродетектора и автоматизированного двухосного транслятора. Представлены результаты измерения пространственного распределения ТГц-излучения, сформированного СВЧ-синтезатором в комбинации с умножителями частоты диапазонов 220–330 ГГц и 500–750 ГГц, исследовано влияние величины апертуры детектора и паразитных переотражений на элементах системы на регистрируемые пространственные профили пучков ТГц-излучения. Представлены методы борьбы с эффектами, связанными с переотражением излучения между источником и детектором.

Ключевые слова: пучки ТГц-излучения, 2D-сканирование оптических пучков, аксикон, «bottle beam», метод «knife edge».

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитных волн перспективен для исследования свойств биологических образцов [1], медицинской диагностики [2, 3], контроля состава окружающей среды [4, 5], создания устройств связи нового поколения [6, 7], дефектоскопии [8, 9], дистанционного зондирования [10], ТГц-визуализации [11, 12], обеспечения безопасности [13]. Все эти приложения требуют формирования направленных пучков ТГц-излучения или пучков с необходимым пространственным распределением [14, 15] и, соответственно, контроля поперечного профиля таких пучков. Пространственное распределение излучения в видимом и инфракрасном диапазонах обычно исследуется с использованием ПЗС-камер. Однако, поскольку энергии фотонов ТГц-диапазона недостаточно для создания пар электрон – дырка в ПЗС-сенсоре, эти устройства неприменимы в данном диапазоне частот.

В настоящее время существующие на рынке матричные детекторы ТГц-диапазона, как правило, основаны на использовании микроболометров [16]. Их недостатками являются невысокая чувствительность, инерционность отклика, достаточно большие размеры отдельного элемента, сложность изготовления матриц с большим количеством пикселей. Авторы работы [17] использовали туннельный механизм создания свободных носителей заряда в ПЗС-элементе, который реализуется для достаточно сильных ТГц-полей, таких, чтобы деформировать зонную структуру фотоактивной среды. Хотя данный механизм имеет пороговый характер, он обеспечивает очень высокую чувствительность измерений. Представленный метод позволил получить более детальное изображение пучка излучения в частотной области 5–13 ТГц в сравнении с микроболометром. Значительным недостатком этого метода является возможность визуализации только излучения с высокой интенсивностью. Также к недостаткам ПЗС-сенсоров можно отнести малый динамический диапазон и низкую величину отношения «сигнал/шум» (англ. Signal to Noise Ratio, SNR) [18].

Альтернативным является подход, основанный на использовании «однопиксельных» детекторов с дополнительной апертурой и механической системы позиционирования, позволяющей регистрировать излучение из локализованной пространственной области. Достоинством такого подхода является возможность использования любых видов детекторов ТГц-диапазона, многие из которых имеют существенно более высокие характеристики по сравнению с ПЗС-матрицами. Например, детекторы на основе циклотронного резонанса и квантового эффекта Холла обеспечивают чувствительность до $1.1 \cdot 10^7$ В/Вт и обнаружительную способность до $4.0 \cdot 10^{13}$ см·Гц^{1/2}/Вт при 4.2 К [19]. Очевидным недостатком такого подхода является механическая система позиционирования, однако данный недостаток не является критическим при макетировании оптических устройств.

* Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 621.396

DOI: 10.17223/00213411/67/12/9

Характеристические моды в теории плоских* и объемных
сверхширокополосных антеннВ.П. Беличенко¹, Ю.И. Буянов¹, Г.А. Дымов¹,
А.С. Мироньчев¹, А.С. Запасной¹, А.В. Горст¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На основе теории характеристических мод исследуется физика излучения плоской и объемной сверхширокополосных антенн. Антенны характеризуются достаточно простой геометрией, однако конфигурация их отдельных элементов обеспечивает не только хорошее согласование с питающей линией, но и широкую полосу пропускания. Выявлено, что такие качества антенн напрямую связаны с их характеристическими модами, а также с рациональным распределением резонансных частот этих мод в пределах заданного частотного диапазона. Продемонстрировано, как использование основных атрибутов теории характеристических мод позволяет улучшать входные параметры и характеристики излучения антенн.

Ключевые слова: комбинированная антенна, физика излучения, характеристическая мода, характеристический угол, значимость моды, полоса пропускания.

Введение

Метод анализа на основе характеристических мод (ХМ) прикладных задач о рассеянии электромагнитных волн различными объектами был предложен Гарбачем в [1]. Метод был использован в ряде других работ с участием автора. Было установлено, что ХМ образуют полезную систему функций для разложения токов и полей рассеяния или излучения не обладающим потерями объектом при гармоническом возбуждении. В частности, они обладают свойством ортогональности как на поверхности объекта, так и на поверхности сферы бесконечного радиуса. Важно то, что их математические свойства могут быть интерпретированы физически в терминах излученной и запасенной мощностей. основополагающие свойства ХМ были сформулированы Гарбачем и Ньюменом в [2].

Более удобная форма изложения теории ХМ была предложена в работах Харрингтона в развитие метода моментов [3, 4].

Как известно [3, 5], анализ задач возбуждения идеально проводящих объектов может быть осуществлен с использованием интегрального уравнения электрического типа

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = jkZ_0 \mathbf{n} \times \int_{\Omega} \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') d^2 \mathbf{r}', \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$ – заданное падающее электрическое поле; \mathbf{n} – вектор единичной нормали к поверхности Ω объекта; $\mathbf{r} \in \Omega$; k – волновое число; Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства; $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ – искомая поверхностная плотность тока, наведенная на объекте падающим полем; $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ – диадная функция Грина для электрического поля в свободном пространстве, определяемая как

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = - \left(\bar{\mathbf{I}} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}.$$

Здесь $\bar{\mathbf{I}}$ – единичная диада; \mathbf{r} и \mathbf{r}' – радиус-векторы точек источника и наблюдения; ∇ – оператор Гамильтона. Интегрирование в (1) проводится по координатам источника \mathbf{r}' . При решении

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

Новая Geant4 база данных по адронным сечениям нейтронов и легких ионов*

А.В. Багуля¹, В.М. Гришин¹, В.Н. Иванченко², Н.А. Чалый²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия

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

Приводится описание методов получения и использования сечений гамма-квантов, нейтронов, протонов и легких ионов для пакета программ Geant4. Новая версия сечений находится в наборе данных G4PARTICLEXS4.1, доступных вместе с новой версией Geant4 11.3 (декабрь 2024 года). Рассмотрены методы подготовки данных, обсуждается точность табулирования и приводятся результаты тестов. База данных предназначена для моделирования экспериментов на БАК, NICA, а также других приложений Geant4.

Ключевые слова: моделирование, Geant4, нейтрон, гамма-квант, протон, ион, сечение.

Введение

Пакет программ Geant4 [1] используется для моделирования методом Монте-Карло прохождения частиц в веществе. Он применяется в различных областях науки и техники, а также в радиационной медицине. Сечения взаимодействия частиц с атомными ядрами являются ключевой частью любого моделирования. В Geant4 существуют два метода для вычисления сечений: использование феноменологической параметризации или использование Geant4 баз данных, которые получены из баз данных, подготовленных международными коллаборациями или агентствами. В обоих случаях сечения базируются на данных измерений, которые используются для подготовки баз данных или аппроксимаций. Наиболее детальные данные по сечениям нейтронов низких энергий представлены в G4NDL4.7 [2], которая была создана из библиотеки данных JEFF-3.3 [3]. Эти нейтронные данные доступны для многих изотопов, включая практически все натуральные изотопы, в диапазоне энергий нейтронов от 10^{-6} эВ до 20 МэВ. Они используются в под-пакете программ ParticleHP (HP – High Precision) и обеспечивают точные предсказания для транспортировки нейтронов в среде. В то же время такое моделирование существенно медленнее стандартного моделирования без использования HP-моделей и сечений. Поэтому был предложен подход XS-сечений, идея которого заключается в предоставлении быстрого доступа к данным сечений для всех энергий с некоторым компромиссом в точности сечений. Поскольку вычисление сечений вызывается на каждом шаге частицы во время ее транспортировки в методе Монте-Карло, быстрое вычисление сечения является важным требованием для увеличения эффективности программы моделирования, что особенно важно для моделирования в физике высоких энергий, в частности, в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) и для экспериментов на коллайдере NICA. В случае моделирования экспериментов на коллайдерах быстроедействие моделирования с XS-сечениями и физической конфигурацией по умолчанию FTFP_BERT [2] в несколько раз превышает скорость вычислений с конфигурацией FTFP_BERT_HP [4].

Метод подготовки базы данных сечений

Geant4 база данных XS представляет из себя файловую систему, на корневую директорию которой указывает переменная среды G4PARTICLEXS_DATA. В данной работе обсуждается версия базы данных G4PARTICLEXS4.1, в которой находятся поддиректории neutron, proton, deuteron, triton, alpha и He3. В каждой поддиректории имеются файлы с сечениями нейтронов, протонов и ионов на натуральных элементах и изотопах. Формат файлов ASCII соответствует формату основного класса данных Geant4 *G4PhysicsVector*. В момент инициализации компонент, отвечающих за моделирование физических процессов Geant4, происходит считывание данных для атомов, которые использованы в описании геометрии для данного моделирования и заполнения объектов *G4PhysicsVector* с сечениями на изотопах и элементах. При многопоточной (multi-threaded) работе

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0048).

Разработка L2-концентратора для эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA*

А.Е. Бернгардт¹, Д.В. Ерофеев¹, В.Н. Борщ¹

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

В рамках развития детекторной установки SPD ускорительного комплекса NICA разработан прототип концентратора второго уровня. Концентратор второго уровня или концентратор L2 представляет собой устройство на базе программируемой логической интегральной схемы. Концентратор L2 предназначен для сбора данных с нескольких концентраторов первого уровня (концентратор L1) по интерфейсам 10G Ethernet и передачи на сервер обработки данных через PCIe интерфейс. В данной статье представлена идея проекта, разработанная архитектура концентратора, описание и пояснения к принципам работы устройства.

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

Введение

Установка Spin Physics Detector (SPD) на ускорительном комплексе Nucotron base Ion Collider Facility (NICA) предназначена для проведения экспериментов по спиновой физике, определения границ существования ядерной материи и полного понимания структуры протона. В ходе проведения экспериментов при регистрации детекторами характеристик частиц после столкновения будет генерировать поток данных, скорость которого по приблизительным оценкам составляет около 20 ГБ/с [1]. Этот поток включает в себя как физические данные, так и сервисные команды.

Для обеспечения такой пропускной способности для систем DAQ необходима специальная электроника, осуществляющая прием и многоуровневую обработку данных с последовательной агрегацией потоков данных в один, для передачи на сервер сбора данных. Далее программное обеспечение сбора и обработки данных осуществляет сборку событий и обработку данных. Общая схема сбора и обработки данных SPD представлена на рис. 1. В данной работе описывается программное обеспечение и аппаратная платформа блока L2 Concentrator (концентратор второго уровня, L2-концентратор).

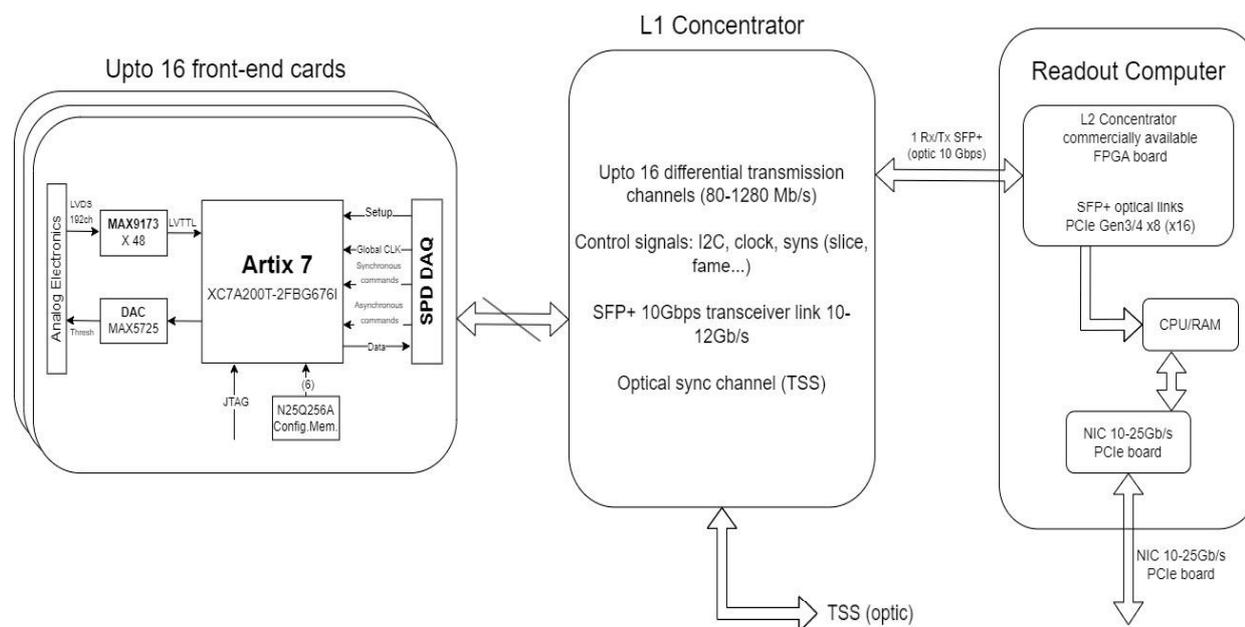


Рис. 1. Схема Readout цепочки эксперимента

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0048).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.46+662.61

DOI: 10.17223/00213411/67/12/12

**Моделирование горения
конденсированных высокоэнергетических материалов,
содержащих порошкообразный алюминий.****II. Модель***В.А. Порязов¹, Д.А. Крайнов^{1,2}, О.Г. Глотов^{1,3}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*³ *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Сформулирована физико-математическая модель горения алюминизированного топлива, особенностью которой является сопряженная постановка и детальный учет эффекта агломерации через привлечение экспериментальных данных. Проведены расчеты и валидация модели с использованием собственных экспериментальных данных. Выявлено, что с увеличением дисперсности металла расчетные значения скорости горения хуже согласуются с экспериментальными. Предложены пути дальнейшего развития модели в части уточнения описания процессов и параметров поведения алюминия в волне горения.

Ключевые слова: *смесевое алюминизированное топливо, модель горения, скорость горения, дисперсная фаза, метод отбора, конденсированные продукты горения, валидация модели.*

Введение

Моделирование процессов горения конденсированных высокоэнергетических веществ является одной из ключевых проблем теории горения. Ниже перечислены основополагающие работы, выполненные с 1938 г. до настоящего времени. Несмотря на столь длительную историю, развитие математического моделирования по-прежнему актуально, поскольку существующие модели пока не могут априори предсказать даже основные характеристики горения, например, скорость горения.

В работе [1] разработана теория стационарного горения перемешанных газов. В [2] предложена феноменологическая теория стационарного горения нитроглицеринового пороха. В [3] описаны особенности нестационарного горения порохов при изменении давления и дано качественное объяснение явления погасания пороха при сбросе давления. В [4] представлены результаты теоретического исследования нестационарного горения ракетных топлив, получены критерии погасания. В [5] представлен метод расчета нестационарной скорости горения порохов в рамках феноменологической теории Зельдовича – Новожилова. В [6] проведено моделирование эрозионного горения твердых ракетных топлив и порохов. В [7] представлена физико-математическая модель зажигания и горения газифицирующихся конденсированных веществ.

В [8, 9] показано, что смесевые составы на основе перхлората аммония (ПХА) характеризуются высокими значениями энергии экзотермического разложения перхлората аммония в к-фазе, а реакция его полного сгорания проходит в газовой фазе.

Основой большинства современных моделей горения смесевых твердых топлив стал подход, предложенный в [10], в нем скорость горения определялась массовыми потоками компонентов топлива. Позднее в [11, 12] было показано, что при горении систем ПХА – полимер зазоров вокруг зерен ПХА не образуется. Применимость модели [10] для проведения инженерных расчетов показана в [6, 13]. В работе [14] предложена модель горения гетерогенных конденсированных систем – модель конкурирующих пламен. Роль ведущей реакции отводится процессу диффузионного горения продуктов газификации компонентов в газовой фазе.

В работах [15, 16] показано влияние дисперсности алюминия, вылетающего с поверхности горения в газовую фазу, на величину скорости горения и устойчивости горения при переходных

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-79-10054.

Синтез и свойства композита на основе CVD-графена и оксида олова, полученного методом магнетронного распыления*

Т.И. Гареев^{1,2}, А.И. Богомолова^{1,2}, А.С. Горкуша^{2,3}, В.С. Суляева⁴,
О.В. Зайцев^{1,2}, О.А. Нерушев¹, Д.В. Сорокин^{1,2}, Д.В. Смовж¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследованы возможности применения метода магнетронного распыления для функционализации графеновой поверхности. Метод HiPIMS использовался для получения наночастиц оксида олова на поверхности CVD-графена. Получены образцы с варьированием времени напыления 5–30 с. Результаты РФА и SEM показали, что получены частицы со средним размером 6,6, 7,4 и 58 нм, при этом фаза, связанная с оксидом олова, наблюдается для композита, осаждаемого 30 с. Проведен анализ спектров комбинационного рассеяния света и обсуждается изменение колебательных свойств графена. Также в работе обсуждаются сенсорные свойства композита на NO₂.

Ключевые слова: магнетронное распыление, CVD-графен, оксид олова, наночастицы, газовый сенсор NO₂, газочувствительность.

Введение

В последнее время активно создаются и исследуются материалы на основе структур различной размерности, а также развиваются способы их получения. Благодаря уникальным свойствам наноразмерных образований композитные материалы, эффективно сочетающие в себе свойства составных частей, способны найти применение в различных областях: оптоэлектронике, газовых и биосенсорах, электронных накопителях, катализе и т.д. Графен, двумерный углеродный материал, благодаря своим свойствам имеет много уникальных применений [1]. Строение, а также выдающиеся тепло- и электропроводящие свойства графена имеют перспективы в области сенсорных технологий [2]. Принцип работы сенсоров основан на взаимодействии сенсорных матриц с веществом и последующем изменении проводящих, емкостных, оптических свойств этих матриц. Основными требованиями к таким системам являются селективность, быстрый отклик, высокая чувствительность, стабильность. Идеальный графеновый слой характеризуется низкой поглощательной способностью, однако присутствие примесей на поверхности и структурные дефекты могут существенно изменять энергию взаимодействия с газовыми молекулами, меняя его сенсорные характеристики [3]. Одним из возможных вариантов является модификация графена газочувствительными наночастицами оксида металлов, например, оксида олова, что способно повысить его селективность в определении наличия опасных газов, таких как NO₂ в атмосфере [4].

Свойства композита во многом определяются качеством графена. Степень дефектности графена определяет проводимость и сказывается на эффективности сенсорных устройств. Метод получения графена путем осаждения углерода из газовой фазы (CVD – chemical vapor deposition) позволяет создавать углеродные слои заданного качества, а также является сравнительно производительным способом, потому обладает большим интересом в промышленных приложениях [5]. Важной задачей является выбор варианта функционализации графена наночастицами. Частицы металлов и оксидов металлов могут быть получены различными способами: физическим осаждением из газовой фазы (PVD) [6], восстановлением солей в растворе [7], химическим осаждением [4] и т.д. Однако большинство методов либо действительны только для оксида графена (GO) или восстановленного оксида графена (rGO), либо содержат этапы с окислительно-восстановительными реакциями, вредными для морфологии и состава углеродного материала. Также недостатком некоторых способов, например, химического осаждения из раствора, является большой разброс размеров формирующихся частиц и невозможность контроля дисперсности, что ухудшает свойства композитов [8]. Электронно-лучевая и фотолитография позволяет создавать наночастицы на поверхно-

* Работа поддержана РФН (грант № 23-29-10130) и соглашением Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (соглашение № р-62).

Управление теплопереносом в импактной струе с решеткой на входе*

С.Н. Яковенко¹

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

Выполнено численное исследование импактной струи с пассивным методом управления с помощью решетки на входе для усиления перемешивания и теплообмена на нагреваемой поверхности, с которой сталкивается струя. Показано, что с ростом числа Рейнольдса число Нуссельта в точке торможения на стенке увеличивается по степенному закону, отвечающему эмпирической аппроксимации. Введение решетки позволяет заметно усилить перенос тепла в центральной части струи. В ходе сравнения с данными измерений обсуждаются эффекты, обнаруженные в расчетах, и перспективы исследований.

Ключевые слова: импактная струя, теплоперенос, пассивное управление, численное моделирование.

Введение

В последнее время заметно возрастает интерес к методам управления струйными течениями и тепломассообменом, что связано с множеством приложений в актуальных задачах энергетики, транспорта, микроэлектроники и других областей, где такие методы, приводящие к ослаблению или интенсификации перемешивания, переноса тепла, массы, частиц, являются востребованными. Во многих физических и численных экспериментах рассмотрены активные способы управления с помощью механических и акустических воздействий на поля скорости и давления от источников продольных, поперечных и азимутальных колебаний, что при определенных условиях вызывает меандрирование и разделение струи на несколько ветвей [1–4]. Менее исследованы ситуации с пассивными методами управления, когда в область вблизи сопла струи вводятся различные объекты [5–7], что также способствует интенсификации перемешивания и тепломассообмена.

В настоящей работе выполнено численное исследование неизотермической импактной струи, натекающей на нагретую поверхность и подверженной пассивному методу воздействия в виде возмущающей течение на входе квадратной решетки двух конфигураций, как в измерениях [7], в сравнении со случаями невозмущенной струи [6, 8]. Такая постановка численных экспериментов реализована впервые. Мотивация исследования и цель работы состоят в валидации и выяснении возможностей вихреразрешающего подхода для моделирования пассивных методов управления, который затем может применяться в дополнение к лабораторным экспериментам или вместо них (в качестве цифрового двойника).

Расстояние (H) от входного сечения до нагретой стенки выбрано равным двум диаметрам ($2D$) отверстия, из которого истекает струя, поскольку для такой постановки доступны данные ряда экспериментов [6] (при $1 \leq H/D \leq 4$), [7] (при $1 \leq H/D \leq 7$), [8] (при $H/D = 2$ и 6), которые можно использовать для сравнения. Уменьшение расстояния ($H < 2D$) привело бы к подавлению развития как вихревых колец, формирующихся вниз по течению от отверстия вследствие сдвиговой неустойчивости Кельвина – Гельмгольца, так и пограничного слоя на нагреваемой пластине. С другой стороны, увеличение расстояния ($H > 2D$) потребовало бы существенного перерасхода вычислительных ресурсов из-за увеличения расчетной области, числа узлов сетки и итераций на каждом шаге по времени для сохранения приемлемой точности счета. Поэтому на начальном этапе выбор $H = 2D$ представляется оптимальным для целей аккуратной валидации вихреразрешающего подхода, а изучение влияния H/D планируется в будущем, в продолжение данной работы.

1. Постановка задачи

Круглая импактная струя, вытекающая со скоростью U из отверстия диаметром D с центром в точке $x = y = z = 0$, моделируется численно на основе решения трехмерных нестационарных уравнений Навье – Стокса с помощью пакета OpenFOAM при числах Рейнольдса $Re = UD/\nu$ из широкого диапазона $500 \leq Re \leq 38\,500$. Размеры вычислительной области и количество ячеек сетки в

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00310, <https://rscf.ru/project/23-27-00310/>.

Исследование эффективности охлаждения криволинейной поверхности при сверхзвуковом и дозвуковом течении основного потока*

А.А. Колесова¹, С.В. Веретенников¹, О.А. Евдокимов¹

¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва,
г. Рыбинск, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования эффективности пленочного охлаждения на криволинейной поверхности за отверстиями цилиндрической формы. Исследование выполнялось при сверхзвуковом ($\lambda = 1.1$) и дозвуковом ($\lambda = 0.8$) течении основного потока и изменении параметра вдува m от 0.5 до 1. Установлено влияние дозвукового и сверхзвукового характера течения основного потока на распределение эффективности охлаждения по длине и ширине криволинейной поверхности, имитирующей течение вблизи стороны разреза сопловой лопатки турбины.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, экспериментальное исследование, сверхзвуковое течение, криволинейная поверхность, дозвуковое течение, параметр вдува.

Введение

Заградительное или пленочное охлаждение активно применяется для защиты от высокотемпературных газовых потоков деталей газотурбинных двигателей [1]. Для тепловой защиты сопловых и рабочих лопаток первых ступеней турбин охлаждающий воздух отбирается за компрессором и вдувается на поверхность лопатки через специальные отверстия – перфорацию, которые располагаются как в области входной кромки, так и на бандажной полке, стороне давления и стороне разряжения пера лопатки [2, 3]. При этом охладитель частично исключается из термодинамического цикла двигателя и его чрезмерное использование для поддержания необходимой температуры деталей приводит к снижению эффективности ГТД. В связи с этим возникает потребность в совершенствовании систем охлаждения, направленных на минимизацию расхода воздуха, вдуваемого через отверстия перфорации, при сохранении максимальной площади защищаемой поверхности.

Начиная с 1970-х годов выполнено большое количество исследований пленочного охлаждения [4]. Показано, что наибольшее влияние на эффективность пленочного охлаждения оказывает параметр вдува m , определяемый как произведение отношений скоростей и плотностей охладителя и основного потока. Исследования показывают [5], что при увеличении параметра вдува до значений $m > 1$ за отверстием цилиндрической формы происходит отрыв защитной пелены от поверхности, что приводит к резкому снижению эффективности охлаждения.

Большое влияние на эффективность струи охладителя оказывает геометрическая форма отверстия для вдува охладителя. В литературе приведены результаты исследований для отверстий различной геометрической формы, однако основным современным трендом является формирование диффузорного участка струи для создания равномерной пелены над защищаемой поверхностью. В частности, Goldstein и Eckert [6] экспериментально показали, что применение веерных отверстий позволяет повысить эффективность пленочного охлаждения по сравнению с отверстиями цилиндрической формы. В исследовании [7] показано, что увеличение длины расширяющейся части веерного отверстия также позволяет повысить эффективность пленочного охлаждения. Dhungel в работе [8] опубликовал результаты экспериментального исследования отверстий, основной принцип которых основан на формировании вихревой структуры, препятствующей подмешиванию основного потока под вдуваемую струю. Данный вид отверстий также способствует увеличению эффективности пленочного охлаждения по сравнению с цилиндрическим типом отверстий для вдува защитной пелены.

В настоящее время наиболее доступным способом организации пленочного охлаждения, широко используемым в серийных двигателях, является перфорация поверхностей цилиндрическими отверстиями, которые могут размещаться практически на любой криволинейной стенке. Вследст-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00666.

УДК 532.5

DOI: 10.17223/00213411/67/12/16

Влияние геометрических особенностей модели циклоидального ротора* на точность расчета тягово-энергетических характеристик

Ар.А. Дектерев^{1,2}, А.В. Сентябов^{1,2}, А.А. Дектерев^{1,2}, Д.А. Дектерев^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Описывается численная модель циклоидального ротора и исследуется влияние геометрических особенностей модели на точность расчета его тягово-энергетических характеристик. Показано, что более полная модель позволяет выполнить более точную оценку как тяги ротора, так и затрачиваемой на работу ротора мощности. Возможность оценки вклада отдельных компонентов позволяет проводить расчеты, направленные на оптимизацию конструкторских решений для повышения эффективности движителя.

Ключевые слова: циклический ротор, CFD, скользящие сетки, тяга, момент.

Введение

В последние годы ведутся активные работы по созданию летательных аппаратов вертикального взлета и посадки с различными типами движителей. Одним из перспективных типов движителей для таких аппаратов является циклоидальный ротор, в котором лопасти, двигаясь по круговой орбите, циклически изменяют угол атаки. При проектировании и оптимизации циклических движителей для изучения аэродинамических характеристик широко применяется численное моделирование. В большинстве работ рассматривается либо двухмерная постановка, либо трехмерная постановка с идеализированной геометрией ротора [1–3], представляющей собой либо просто набор лопастей, либо набор лопастей, ограниченный плоскими боковыми дисками (рис. 1).

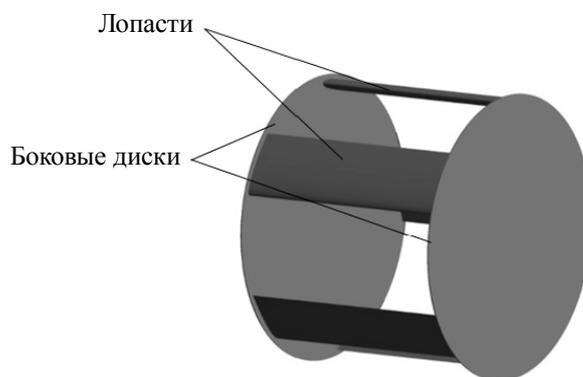


Рис. 1. Геометрия ротора в идеализированной геометрической постановке

В ходе разработки и первичной оптимизации циклоидального ротора нами также было использовано численное моделирование с использованием идеализированной геометрической постановки. Такая постановка позволяет минимизировать время на подготовку расчетной области и экономить вычислительные ресурсы за счет относительно небольшой детализации расчетной сетки. Расчеты в идеальной постановке использовались для выбора оптимального профиля и количества лопастей, подбора диаметра и длины ротора под необходимые тяговые характеристики, оптимизации кинематической схемы изменения углов лопастей.

При проведении измерений на экспериментальном роторе было обнаружено заметное расхождение между экспериментальными и расчетными данными как по тяге ротора, так и по затрачиваемой мощности. Для приближения модели к условиям реального эксперимента расчетная геометрия была максимально приближена к реальной конструкции ротора.

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (124062400029-2).

Особенности электрокоалесценции незаряженной капли со слоем воды в переменном электрическом поле*

И.А. Елагин¹, Г.С. Ягодин¹, В.А. Чирков¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Численно исследовано объединение незаряженной капли воды, взвешенной в масле, со слоем воды под действием переменного электрического поля. Проведено сравнение режимов коалесценции при использовании постоянного и переменного синусоидального электрического поля. Выявлено, что наибольшее влияние на объем отделяющейся капли оказывают частота и фаза касания (при частотах, близких к собственной частоте колебания капли), в то время как другие параметры влияют слабо. Показано, что при использовании переменного электрического поля появляется разброс значений объема отделяющейся капли, который определяется фазой, при которой капля соприкоснулась со слоем. При увеличении частоты напряжения наблюдается уменьшение разброса объема отделяющейся капли и его стремление к значениям, полученным при постоянном напряжении.

Ключевые слова: электрокоалесценция, капля – слой, численное моделирование, частичная коалесценция, водонефтяная эмульсия, двухфазная жидкость, переменное электрическое поле.

Введение

При добыче сырой нефти из нефтяных скважин используют методы, в результате которых образуется мелкодисперсная водяная эмульсия обратного типа [1], которую необходимо разделить на две фазы для дальнейшей обработки нефти. Так как плотности воды и нефти сравнительно близки и ввиду высокой вязкости нефти отделение капель воды микронного размера под действием сил тяжести занимает продолжительное время, что сказывается на итоговой стоимости очищенных нефтепродуктов.

Одним из наиболее эффективных методов очистки нефти от воды является электрокоалесценция [2]. Этот метод основан на механизме объединения капель воды под действием сильных электрических полей, в результате чего увеличивается средний размер капель и уменьшается время их осаждения под действием силы тяжести. Большинство соответствующих устройств – электродегидраторов – выводят каплю из объема масла путем ее объединения со слоем воды. При приближении капли воды к границе раздела «масло – слой воды» может произойти как полное объединение капли со слоем (коалесценция), так и частичное (частичная коалесценция), а также режим растяжения вдоль межэлектродного промежутка.

В электродегидраторах может использоваться как постоянное, так и импульсное или переменное напряжение [3]. В литературе принято разделять случаи применения различных форм напряжения ввиду их влияния на скорость очистки водонефтяной эмульсии, а также на вероятность появления негативных эффектов, таких как образование цепочек из капель [4] и растяжение капли в перемычку [5] с замыканием межэлектродного промежутка. На практике используются только синусоидальные и импульсные поля, так как считается, что они лучше предотвращают появление цепочек из капель [6].

На данный момент в литературе почти нет информации о том, как результаты, полученные при моделировании взаимодействия незаряженной капли со слоем воды в постоянном электрическом поле, соотносятся со случаем переменного поля. В частности, непонятно, есть ли принципиальные особенности и существенное влияние прикладываемой частоты на пороговые значения напряженности электрического поля, при которых происходит переход к частичной коалесценции и растяжению капли. Также непонятно, как влияет фаза напряжения в момент касания капли и слоя на исход коалесценции.

Эти вопросы являются важными для разработки более эффективных и надежных электродегидраторов, и их решение позволит значительно повысить эффективность процесса очистки нефти от воды за счет подавления режима частичной коалесценции, сократить время обработки и снизить затраты на производство нефтепродуктов.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10078, <https://rscf.ru/project/22-79-10078/>.

Моделирование сброса жидкого хладагента при авиационном тушении пожаров*

В.А. Архипов¹, С.А. Басалаев¹, К.В. Костюшин¹, Е.Л. Лобода^{1,2},
О.В. Матвиенко^{1,3}, К.Г. Перфильева¹, В.И. Романдин¹, А.С. Усанина¹

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

² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

³ *Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*

Рассмотрена методика моделирования авиационной технологии тушения пожаров, основанная на сбросе жидкого хладагента из модельного сливного устройства (МСУ), установленного на беспилотном летательном аппарате. Проведено экспериментальное исследование динамики разрушения струи жидкости и пространственного распределения плотности орошения. Проведен анализ результатов расчетов плотности орошения по разработанной авторами математической модели, адаптированной применительно к МСУ, с экспериментальными данными.

Ключевые слова: пожаротушение, плотность орошения, беспилотный летательный аппарат, водосливное устройство, очаг возгорания, капельно-воздушное облако.

Введение

Одним из эффективных способов тушения крупных пожаров является сброс жидкого хладагента, как правило воды, в очаг пожара с борта летательного аппарата. Распыленное жидко-капельное облако охлаждает зону горения, а также за счет испарения блокирует доступ кислорода к горючим элементам. В настоящее время разработан ряд математических моделей расчета гравитационного осаждения жидко-капельного облака, процессов его испарения и взаимодействия с очагом горения [1–5], в частности, применительно к сбросу жидкости из водосливного устройства ВСУ-5А, установленного на вертолете МИ-8. В работах [3, 4] предложена физико-математическая модель, позволяющая рекомендовать оптимальные параметры тушения (направление и скорость полета, высота сброса, топологии очага пожара), обеспечивающие требуемую плотность орошения с учетом реальных метеоусловий. Для практического внедрения разрабатываемых математических моделей технологии авиационного пожаротушения необходима их апробация. Проведение натурального эксперимента по определению пространственного распределения плотности орошения подстилающей поверхности при сбросе жидкости из водосливного устройства реального летательного аппарата связано с большими материальными затратами и экономически не целесообразно.

В настоящей работе предложена методика моделирования сброса жидкого хладагента при авиационном тушении пожара с использованием недорогого беспилотного летательного аппарата (БПЛА), снабженного модельным водосливным устройством (МСУ). Дано описание специально разработанного экспериментального оборудования, приведены результаты исследования динамики распада струи жидкости с начальным диаметром 50 мм при ее сбросе с высоты 8–14 м. Рассмотрена оригинальная методика измерения пространственного распределения плотности орошения, основанная на взвешивании пористых ячеек до и после сброса жидкости. Проведена необходимая корректировка начальных условий, входящих в математическую модель [4], применительно к предлагаемой методике моделирования. Проведен сравнительный анализ результатов параметрических расчетов с данными полигонных испытаний (по плотности орошения и по тушению модельных очагов пожара).

Описание экспериментального оборудования

Для моделирования процессов сброса хладагента и определения плотности орошения разработана экспериментальная беспилотная авиационная система [6, 7], включающая в себя БПЛА мультироторного типа (рис. 1, а), оснащенный системой сброса хладагента МСУ (рис. 1, б), станцию внешнего пилота, линии управления и контроля, систему передачи телеметрии и систему фиксации научных данных. Винтомоторная группа БПЛА включала в себя четыре бесколлекторных

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

Математическое моделирование в задаче обнаружения паров взрывчатых веществ от источника в почве*

О.Б. Кудряшова¹, В.М. Грузнов², С.Д. Соколов¹, А.Б. Ворожцов¹, Ю.М. Михайлов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*
² *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Проблема гуманитарного разминирования остается актуальной в глобальном масштабе из-за большого количества находящихся в земле неразорвавшихся боеприпасов и мин. При этом важной подзадачей является поиск таких боеприпасов, которые невозможно обнаружить с помощью металлодетекторов, инфракрасной съемки с воздуха и т.п. В этом случае единственной возможностью обнаружения остается поиск следовых количеств веществ в воздухе над почвой и в поверхностных слоях почвы с помощью химических датчиков, биологическими способами (собаки, крысы, пчелы). Эффективность и полезность этих способов обнаружения закопанных боеприпасов возможно оценить лишь при рассмотрении процессов переноса химических сигнатур взрывчатых веществ (ВВ) через почву. В работе предложена и исследована математическая модель переноса паров взрывчатых веществ через слой почвы. Рассматривается диффузия как основной механизм движения паров через воздушные поры в почве. На основе параметрического исследования модели изучено влияние влажности почвы на скорость движения паров; на основе анализа размерностей задачи введено характерное время возможного обнаружения паров ВВ над поверхностью почвы. Проведены оценки концентрации паров над поверхностью почвы для некоторых взрывчатых веществ (RDX, PETN, TNT) в зависимости от глубины и времени залегания источника в песке различной влажности. В результате теоретических расчетов обнаружено, что рост концентрации паров над поверхностью происходит нелинейно. При этом время обнаружения паров ВВ может быть снижено на 1–2 порядка, если чувствительность прибора будет повышена на 1–2 порядка по сравнению с чувствительностью, необходимой для регистрации насыщенных паров ВВ. Обсуждаются недостатки и ограничения модели и связанные с этим направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: *неразорвавшиеся боеприпасы, диффузионная модель, обнаружение паров, взрывчатые вещества.*

Введение

По некоторым оценкам, более чем в шестидесяти странах в земле находится около ста миллионов закопанных неразорвавшихся снарядов и мин [1]. По данным Организации Объединенных Наций, ежегодно десятки тысяч человек становятся жертвами мин, многие из них – дети. Минные поля препятствуют безопасному возвращению беженцев и внутренне перемещенных лиц, замедляют экономическое восстановление и сельскохозяйственное производство. Гуманитарное разминирование – это процесс удаления мин и неразорвавшихся боеприпасов (НБ) из бывших зон конфликта с целью обеспечения безопасности местного населения и восстановления экономической деятельности. Эта проблема охватывает многие регионы мира, включая Африку, Ближний Восток, Юго-Восточную Азию и Восточную Европу. Важная и сложная проблема гуманитарного разминирования требует использования различных технологий и методов для обнаружения и обезвреживания мин и неразорвавшихся боеприпасов. Поскольку поиск мин саперами и/или с использованием животных является рискованным, в разминировании все больше применяют современные беспилотные и интеллектуальные технологии. [2]. Использование дронов для поиска мин становится все более популярным из-за их способности обеспечивать безопасные и эффективные методы обследования опасных территорий. Дроны могут быть полезны для первичного обследования территорий, картографирования, обнаружения мин по тепловому следу, мониторинга процесса разминирования и т.п. [3, 4]. Развиваются также методы дистанционного обнаружения паров взрывчатых веществ (ВВ) [5, 6].

Таким образом, поиск и обнаружение закопанных мин и НБ представляет собой сложную задачу для технического сообщества. Обычно используют технологии на основе поиска металлических предметов под землей [7]. У этих технологий имеются свои сложности, связанные с обнаружением скрытых аномалий, высоким уровнем ложных тревог, а также с невозможностью обнаружить неметаллические боеприпасы. Имеются также ограничения по глубине залегания, замусоренности местности металлом, электромагнитными помехами. Следовательно, требуются другие

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

Твердые горючие материалы с металлическими добавками, полученные методом 3D-печати*

Я.А. Дубкова¹, Д.А. Ткачев¹, Я.Ю. Верхошанский¹,
И.А. Бельчиков¹, А.С. Жуков¹, Т.В. Жукова¹

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

Проведено исследование твердых горючих материалов с добавлением порошков алюминия различной дисперсности для аддитивной печати методом проекционной стереолитографии (DLP). Согласно результатам исследования глубины полимеризации в зависимости от времени воздействия УФ-излучения, максимальная толщина слоя для материалов с добавлением субмикронного и наноразмерного порошков алюминия составляет не более 70 мкм, что не позволяет использовать их для 3D-печати объемных образцов. Материал с добавлением алюминия марки АСД-6 полимеризуется на глубину до 300 мкм при экспозиции УФ-излучения в течение 60 с, что позволило изготовить методом DLP 3D-печати объемные образцы на его основе. Тепловыделение при термическом разложении полимеризованных образцов материалов существенно зависит от дисперсности алюминия в состав. Так, тепловыделение при термическом разложении полимеризованных образцов с порошком АСД-6 в составе составило 3077 Дж/г, в то время как при термическом разложении полимеризованных образцов с добавлением субмикронных порошков алюминия тепловыделение составляет до 6070 Дж/г. Полученные аддитивным методом образцы поддерживают горение при атмосферном давлении на воздухе, при этом фиксируется вылет частиц алюминия с поверхности. Недогоревшие частицы алюминия также фиксируются в конденсированных продуктах сгорания.

Ключевые слова: *твердый горючий материал, аддитивные технологии, стереолитография, горение, порошки алюминия.*

Введение

Современные исследования в области аддитивных технологий все больше затрагивают область высокоэнергетических материалов (ВЭМ), в частности твердых горючих материалов (ТГМ). Для формирования геометрии ВЭМ различными исследовательскими коллективами предлагаются такие методы 3D-печати, как струйная печать (Ink Jetting) [1, 2], методы прямой наплавки (FDM), стереолитография (SLA) [3, 4], прямое нанесение чернил (DIW) [5], электроэрозионное напыление (ESD) [6]. В части 3D-печати металлизированных композиций ВЭМ большинство работ относятся к исследованию применения аддитивных технологий для изготовления термитных композиций и топлив для гибридных двигателей. Так, в работе [7] авторами были получены высоконаполненные термитные суспензии, содержащие 90 мас.% нанотермита системы Al–CuO для экструзионной печати. Скорость горения полученных образцов составляла 25 см/с. Существуют работы, описывающие получение топлива для гибридного двигателя из полилактида (PLA), содержащего частицы алюминия [8], и ABS, содержащего 2, 4 и 6 мас.% меди [9]. В части 3D-печати металлизированных ТГМ в литературе представлены единичные работы отдельных авторов [10–13]. Так, Коллардом и Маклайен [12] методом FDM были получены экспериментальные образцы, содержащие 50 мас.% нано- и микроразмерных алюминиевых порошков в различных соотношениях. Скорость горения составляла до 42.4 мм/с. Порчел [10] методом экструзии получал материалы, содержащие 90 мас.% ПХА и 3 мас.% микроразмерного порошка алюминия. Значения скорости горения составляли 2.0–2.9 мм/с. Следует отметить, что в вышеописанных работах рассматриваются преимущественно экструзионные методы, в которых в качестве связующих используются термопластичные материалы, т.е. их переход в жидкое состояние для формирования заданной геометрии обеспечивается за счет нагрева, что накладывает существенные ограничения при рассмотрении высокорекреационноспособных составов. В этой связи применение аддитивных методов, не связанных с нагревом исходного материала, является более перспективным в части 3D-печати ВЭМ. Среди таких методов возможно выделить проекционную стереолитографическую 3D-печать (DLP). Коллективом авторов настоящей работы ранее были проведены исследования, подтвердившие принципиальную возможность формирования ТГМ методом DLP-печати [14, 15]. К текущему моменту в экспериментах по 3D-печати ВЭМ рассматривались композиции без введения ме-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00724, <https://rscf.ru/project/23-29-00724/>.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.911, 538.913, 539.216.2, 539.26

DOI: 10.17223/00213411/67/12/21

Наноструктурирование ленгмюровских пленок нитрида бора*

И.В. Локтионова¹, А.П. Кузьменко¹, П.В. Абакумов²¹ Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия² Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Россия

Выполнена характеристика пленок из наночастиц нитрида бора, стабилизированных стеариновой кислотой, показаны различия в их формировании методами клиновидной дегидратации и Ленгмюра – Блоджетт. Изучен фазовый переход кристаллической структуры после отжига ленгмюровских нанопленок.

Ключевые слова: нитрид бора, ленгмюровские нанопленки, структурные фазовые превращения, текстурирование.

Введение

Развитие современных интегрированных и интеллектуальных электронных устройств требует поиска новых материалов с уникальным сочетанием рекордных электросопротивления (широкозонности) и теплопроводности. В зоне пристального внимания в этой связи оказались двумерные материалы, ярким и широко востребованным примером которых стал нитрид бора. Формируемые структуры характеризуются гексагональным – *h*-BN, ромбоэдрическим – *r*-BN, вюрцитным – *w*-BN и кубическим – *c*-BN упорядочением и могут иметь чешуйчатые (графеноподобные), сферические (фуллереноподобные) и трубчатые (нанотрубки) формы [1–3]. Атомы, расположенные в плоскости [100], связаны ковалентными связями, в то время как межплоскостные слои объединены слабыми силами Ван-дер-Ваальса. Гексагональный нитрид бора обладает сопоставимой с графеном теплопроводностью до 400 Вт/(м·К) в плоскости [1] и до 5.7 Вт/(м·К) в высокотекстурированных пленках [3]. Теоретически показано, что повышение теплопроводности от 200 до 500 Вт/(м·К) объясняется уменьшением влияния фонон-фононного рассеяния при утонении образцов из *h*-BN [4, 5]. Пленочные слоистые структуры *h*-BN обладают термической стабильностью на воздухе – до 1276 К, в вакууме – до 1673 К, в инертной атмосфере – до 3073 К, а отжиг улучшает их кристалличность [6–8]. В пленках *h*-BN, выращенных методом металлоорганического химического осаждения из паровой фазы после термического отжига вплоть до 1600 °С, отмечено сужение рамановского пика *h*-BN $E_{2g} \sim 1370 \text{ см}^{-1}$, т.е. повышалась их кристалличность, тогда как начиная с 1700 °С она снижалась [9]. Пленки, выращенные на подложках из сапфира методом химического осаждения из паровой фазы, после отжига при 1300 °С в атмосфере азота характеризовались четкой зернистой структурой, при этом отмечался рост E_g с 5.70 до 5.82 эВ [10–12]. Кубические структуры – *c*-BN, которые формировались, в частности, в процессе импульсного лазерного отжига *h*-BN [13], обладающие после соответствующего допирования *n*- и *p*-проводимостями с высокими подвижностями, крайне востребованы при создании микроэлектронной компонентной базы. Наличие этих и других уникальных свойств *c*-BN и *h*-BN обуславливает все возрастающий интерес к исследованиям пленочных структур из нитрида бора, что актуализирует исследования по совершенствованию техник и технологий их получения [1–3, 12–14].

В настоящей работе представлены результаты исследований особенностей структурирования нанопленок из наночастиц нитрида бора, стабилизированных стеариновой кислотой, наносимых методами Ленгмюра – Блоджетт (ЛБ) и клиновидной дегидратации. Оба метода отличает ряд существенных преимуществ, в частности, пленочные высокоупорядоченные молекулярные слои наносятся при н.у., а в основе их формирования действуют процессы самоорганизации. Анализ оте-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (г/з № 0851-2020-0035) и в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

Сорбция и десорбция водорода порошком Ti–Ni, легированным титаном*

Е.В. Абдульменова¹, С.П. Буякова¹

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

Изучена сорбция и десорбция водорода порошком Ti–Ni, подвергнутым механохимическому легированию титаном. Содержание титана в порошковой смеси (Ti–Ni) – Ti составляло 15 мас.%. Насыщение водородом порошковой смеси (Ti–Ni) – Ti проводили электрохимическим способом, десорбцию водорода изучали в процессе выдерживания ее в воздушной атмосфере. Установлено, что после механохимического легирования порошковая смесь (Ti–Ni) – Ti состояла из фаз Ti₂Ni и TiNi(B2, B19'). Фаза Ti₂Ni в порошковой смеси (Ti–Ni) – Ti была представлена двумя модификациями, отличающимися параметрами ячеек Ti₂Ni (I) и Ti₂Ni (II). Параметр ячейки Ti₂Ni (I) составил $(1.1285 \pm 5 \cdot 10^{-4})$ нм, параметр элементарной ячейки фазы Ti₂Ni (II) составил $(1.1274 \pm 5 \cdot 10^{-4})$ нм. Так, фаза Ti₂Ni (I) наследована из исходного порошка Ti–Ni, а фаза Ti₂Ni (II) сформировалась в процессе механохимического легирования. Выявлено, что электрохимическое гидрирование порошковой смеси (Ti–Ni) – Ti в течение 360 мин приводит к изменению параметра решетки Ti₂Ni (II), который соответствует параметру гидрида Ti₂NiH_{2,8}. Обнаружено, что после 30 дней выдерживания порошковой смеси в воздушной атмосфере интегральная интенсивность дифракционных линий, принадлежащих гидриду, несколько снижается, что указывает на медленный процесс десорбции водорода. После 760 дней выдерживания порошковой смеси в воздушной атмосфере интегральная интенсивность дифракционных линий, принадлежащих гидриду, значительно уменьшается, что свидетельствует почти о полной его деградации.

Ключевые слова: Ti–Ni вблизи экваторного состава, механохимическое легирование, титан, параметр решетки, фазовый состав, водород, сорбция, десорбция.

Введение

В настоящее время мировая энергетика основана на использовании углеводородных исчерпаемых источников энергии, которые приводят к загрязнению окружающей среды за счет выделения парниковых газов при их сжигании [1]. В связи с этим поиск альтернативных возобновляемых и экологически чистых (без углеродистых) источников энергии является приоритетной современной мировой задачей. Водород является потенциальным безопасным и экологически чистым источником энергии, который способен удовлетворить широкий круг потенциальных потребителей [2, 3].

Твердые носители водорода в форме гидридов металлов представляют наибольшую перспективу в хранении и транспортировке водорода за счет обратимого аккумулялирования водорода [4–6]. Наибольшей стойкостью к окислению среди металлических материалов, способных обратимо адсорбировать водород, обладает сплав на основе Ti₂Ni [7]. Однако его способность сорбировать и десорбировать водород зависит от способа получения [8]. Такое различие в сорбционной способности при использовании разных методов получения сплава на основе Ti₂Ni обусловлено образованием оксидных слоев и формированием необратимого гидрида Ti₂NiH_{0,5}, препятствующего многократным циклам сорбции/десорбции водорода [9, 10].

Для устранения оксидных слоев, препятствующих сорбции водорода, применяется нагрев в вакууме при температуре 450 °С с последующим отжигом в атмосфере H₂ при давлении 7 бар [11]. Для активации циклического процесса сорбции/десорбции используют модификацию поверхности, легирование переходными металлами, углеродными трубками и пр. [12]. Альтернативным подходом к решению проблем существования оксидных слоев и активации циклических процессов сорбции/десорбции водорода может являться применение механохимического синтеза, поскольку большими сорбционными характеристиками обладают дисперсные системы. Применение высокоинтенсивной механической обработки, используемой в механохимическом синтезе, приводит к разрушению оксидных слоев за счет дробления частиц, что обеспечивает диффузию водорода в материал.

Обычно при синтезе сплава на основе Ti₂Ni используются отдельные порошки Ti (TiH₂) и Ni [4, 7, 13]. В этом случае при синтезе могут формироваться вторичные фазы TiNi и Ni₃Ti, которые влияют на сорбцию/десорбцию водорода. В данной работе для полного формирования Ti₂Ni пред-

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

EBSD-исследование высокотемпературной макролокализации деформации монокристаллов Ni_3Ge в условиях ползучести*

Ю.В. Соловьева¹, И.Г. Вовнова¹, Я.Д. Липатникова¹, М.В. Геттингер¹, О.Д. Пантюхова¹

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

Представлены результаты комплексного исследования высокотемпературной макролокализации пластической деформации монокристаллов сплава Ni_3Ge со сверхструктурой $L1_2$ в условиях ползучести. Структурные исследования процессов формирования полосы макролокализации были проведены с помощью оптической, сканирующей электронной микроскопии и методом EBSD-анализа (метод дифракции обратно рассеянных электронов). Показано, что полоса локализации представляет собой макрообъем кристалла со средним углом поворота $\approx 45^\circ$ относительно общего объема образца. Внутренняя структура полосы состоит из субзерен неправильной формы, вытянутых вдоль полосы локализации, с углами разориентации $1-5^\circ$. Приведены схемы, иллюстрирующие механизмы субструктурной трансформации в полосе макролокализации. Предполагается, что структурные превращения в полосе локализации связаны с интенсивным диффузионным переползанием краевых дислокаций, взаимодействующих с деформационными точечными дефектами и формированием малоугловых границ.

Ключевые слова: монокристаллы, Ni_3Ge , пластическая деформация, дислокации, макролокализация, метод обратного рассеяния электронов.

Введение

Локализации деформации, которые являются неотъемлемым свойством пластического течения твердых кристаллических тел, являются предметом особого внимания широкого круга исследователей [1–4]. Показано, что неоднородности пластической деформации играют большое значение в технологических процессах обработки различных материалов, таких как процессы осадки,ковки, штамповки, прокатки [5–7]. Развитие локальных сдвигов необходимо учитывать также при рассмотрении разрушений изделий в различных условиях эксплуатации.

Хорошо известным и установленным свойством кристаллов различного типа является формирование макролокализованных сдвигов в условиях высокотемпературной пластической деформации при температурах более $0.5T_{пл}$. Впервые это явление, выражающееся в практически неограниченном пластическом сдвиге в локальных объемах материала, было обнаружено при деформации металлических кристаллов Zn и Cd [8]. На боковых поверхностях деформированных кристаллов образовывались полосы локализации деформации, величина локальной сдвиговой деформации в которых составляла тысячи процентов при общей средней деформации порядка десятка процентов. Подобное деформационное поведение оказалось свойственным также щелочно-галлоидным [9–12] и сегнетоэлектрическим кристаллам [13]. Наиболее ярко данное явление, получившее название суперлокализация или макролокализация пластического течения, выражено при высокотемпературной деформации монокристаллов интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$, было обнаружено на монокристаллах сплава Ni_3Ge с осью сжатия, близкой или совпадающей с кристаллографическим направлением [001] [14]. Материалы данного класса обладают выраженной аномальной температурной зависимостью механических свойств (с увеличением температуры в определенном интервале сдвиговые напряжения, предел текучести и коэффициент упрочнения возрастают почти на порядок), что обуславливает высокий уровень деформирующих напряжений и большую плотность деформационных дефектов в высокотемпературной области [14]. Исследования деформации монокристаллов интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$ показало, что высокотемпературная ползучесть данных сплавов сопровождается макролокализацией [15]. Подобные явления наблюдались и в сложном по составу монокристаллическом суперсплаве [16], и в высокоэнтропийном сплаве, содержащем $L1_2$ -частицы [17]. К настоящему моменту времени природа высокотемпературной макролокализации монокристаллов интерметаллидов со сверхструктурой $L1_2$ в условиях ползучести остается до конца не выясненной. В связи с этим целью настоящей работы является исследование субструктурных превращений в локальных объемах кристалла, соответ-

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

ГЦК↔ГПУ-мартенситное превращение и эффект памяти формы в монокристаллах CrFeMnCoNi высокоэнтропийного сплава при твердорастворном упрочнении атомами углерода*

И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹, Д.А. Куксгаузен¹, А.В. Выродова¹, А.А. Сараева¹

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

Впервые на монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.9}\text{C}_{0.1}$ высокоэнтропийного сплава с осью растяжения $[\bar{1}11]$ исследован эффект памяти формы (ЭПФ) при обратимом ГЦК↔ГПУ-мартенситном превращении (МП) от условий деформации: при температуре M_n для начала прямого МП при охлаждении в цикле «нагрузка – разгрузка» и при постоянном растягивающем напряжении в цикле «охлаждение – нагрев». Показано, что ГЦК↔ГПУ МП характеризуется температурой начала прямого МП при охлаждении $M_n = 250$ К и широким термическим гистерезисом 150 К. Максимальный ЭПФ составил 4.3% при растягивающем напряжении $\sigma_p = 275$ МПа при постоянном увеличении σ_p от 75 до 275 МПа в цикле «охлаждение – нагрев» и 6.7% при повторяющихся циклах «нагрузка – разгрузка» при температуре M_n . Обнаружено различие в напряжениях для образования мартенсита под нагрузкой при исследовании ЭПФ под нагрузкой в цикле «охлаждение – нагрев» и при исследовании температурной зависимости предела текучести $\sigma_{0.1}(T)$, которое составляет 100 МПа при температуре M_n .

Ключевые слова: *CrFeMnCoNiC высокоэнтропийный сплав, монокристаллы, обратимое ГЦК↔ГПУ-мартенситное превращение, эффект памяти формы, твердорастворное упрочнение углеродом, растяжение.*

Введение

Известно [1, 2], что твердорастворное упрочнение ГЦК-сплавов (ГЦК – гранцентрированная кубическая решетка) атомами внедрения (углеродом и азотом) является более эффективным, чем атомами замещения. В стабильных сплавах с ГЦК-решеткой, не испытывающих мартенситное превращение (МП), увеличение уровня напряжений на пределе текучести $\sigma_{0.1}$ за счет твердорастворного упрочнения атомами внедрения при концентрации $C < 0.3$ мас.% приводило к локализации деформации в одной системе и к развитию планарной дислокационной структуры с плоскими скоплениями дислокаций [1, 3]. При концентрации атомов внедрения $C > 0.3$ мас.% происходила смена механизма деформации от скольжения к двойникованию [1, 3]. При этом двойники были дополнительно упрочненными за счет изменения положения атомов внедрения при сдвиге на модуль вектора Бюргерса частичной дислокации Шокли $a/6\langle 112 \rangle$. В ГЦК-исходной фазе атомы внедрения находились в октаэдрических междоузлиях, а в двойнике – в тетраэдрических междоузлиях, размеры которых меньше [4]. Это сопровождалось увеличением протяженности стадии линейного упрочнения и увеличением пластичности при $C < 0.3$ мас.% и ростом коэффициента деформационного упрочнения при $C > 0.3$ мас.% [1, 3]. В сплавах Fe–Mn–Si с обратимым ГЦК↔ГПУ (ГПУ – гексагональная плотноупакованная решетка) МП твердорастворное упрочнение атомами углерода концентрацией 0.12 мас.% (0.12 мас.% ~ 0.56 ат.%) сопровождалось понижением температуры начала прямого МП при охлаждении M_n , увеличением термического гистерезиса $\Delta T = A_k - M_n$ (A_k – температура конца обратного МП при нагреве) и увеличением циклической стабильности обратимой деформации в циклах «нагрузка – разгрузка» [5–8]. Исследований по влиянию атомов внедрения на развитие обратимого ГЦК↔ГПУ МП в моно- и поликристаллах высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) в литературе нет.

В настоящей работе ставилась задача: на монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.9}\text{C}_{0.1}$ (ат.%) ВЭС с осью растяжения $[\bar{1}11]$ исследовать влияние малой концентрации атомов углерода $C_C = 0.1$ ат.% ~ 0.02 мас.% на развитие обратимого ГЦК↔ГПУ МП под нагрузкой и ЭПФ. Концентрация атомов углерода 0.1 ат.% выбиралась таким образом, чтобы атомы углерода находились только в твердом растворе и не образовывали частиц карбидов. Выбор ориентации $[\bar{1}11]$ обусловлен следующими причинами. Во-первых, кристаллы данной ориентации ориентированы для развития МП одновременно в нескольких системах из-за равного фактора Шмида для ГЦК–ГПУ МП $m_{\text{ГПУ}} = 0.31$ [3]. Во-вторых, ранее на монокристаллах с осью растяжения $[\bar{1}11]$ $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС без атомов уг-

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2024-0007.

Влияние интенсивной пластической деформации на зеренную структуру и фазовый состав технически чистой УМЗ-меди*

Н.А. Попова¹, Е.Л. Никоненко¹, Ю.В. Соловьева¹, В.А. Старенченко¹

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

Методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведено исследование зеренной структуры, фазового состава, скалярной плотности дислокаций в технически чистой ультрамелкозернистой меди, полученной в условиях интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением. Установлено, что в соответствии с характером дислокационной структуры зерна были классифицированы на четыре типа: 1) самые мелкие зерна, не обладающие субструктурой (в них практически отсутствуют дислокации) – бездислокационные зерна, 2) более крупные зерна, содержащие хаотически распределенные дислокации или сетчатую субструктуру, 3) самые крупные зерна с ячеистой или фрагментированной субструктурой и 4) рекристаллизованные зерна, обладающие размером, существенно превосходящим средний размер, и содержащие хаотически расположенные дислокации и нанодвойники отжига. Рассчитана средняя величина скалярной плотности дислокаций в зернах каждого типа. Установлено, что интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением привела к образованию в ультрамелкозернистой меди частиц вторичных фаз, обладающих нанометрическим размером и локализованных внутри, на границах и в стыках зерен.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением, ультрамелкозернистая медь, зерно, частица, объемная доля, дислокационная субструктура, скалярная плотность дислокаций.

Введение

Измельчение зерен с помощью интенсивной пластической деформации (ИПД) приводит, как хорошо известно, к повышению прочности объемных металлических конструкционных материалов [1–6].

В настоящее время существует целый ряд методов ИПД, таких как равноканальное угловое прессование, интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением (ИПДК), всесторонняя ковка, циклическая деформация «осадка – экструзия – осадка», метод многократного изгиба и выпрямления полосы и др. [1–11]. Одним из эффективных методов ИПД является интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением [1, 3, 4, 9–13]. Это метод, при котором образец, имеющий форму тонкого диска, подвергается деформации кручением под высоким гидростатическим давлением [1]. Таким путем удается получать материалы с ультрамелким размером зерен (УМЗ). Отличие мелкозернистой структуры от фрагментированной состоит в том, что зерна, как правило, ограничены большеугловыми границами (угол разориентировки больше 6°), а фрагменты – малоугловыми границами (угол разориентировки меньше 6°) [14].

Известно также, что структура УМЗ-материалов может быть стабилизирована наноразмерными частицами вторых фаз, расположенными на границах и в стыках зерен [1, 15–23]. В однофазных УМЗ-металлах частицы вторых фаз нередко возникают в ходе ИПД [16, 19, 21]. В ходе ИПД дислокации активно захватывают примеси замещения и особенно внедрения и выносят их на границы. Большое количество точечных дефектов и общая высокая плотность других дефектов ускоряют диффузионные процессы. Сильно деформированный металл дополнительно захватывает примеси из окружающей атмосферы. Вследствие этого в ходе ИПД в УМЗ-материалах формируются частицы вторичных фаз, как равновесные диаграммные, так и метастабильные. Расположенные на границах и в стыках зерен эти частицы препятствуют перемещению границ и тем самым участвуют в формировании УМЗ-структуры [15, 16].

Таким образом, УМЗ-материалы, полученные путем ИПД, обладают сложной внутренней структурой. Поэтому трактовка данных электронной микроскопии затруднена, так как внутри структуры УМЗ-зерен могут присутствовать ячейки и фрагменты с разнообразными дислокационными границами. При этом границы часто искривлены, содержат дислокации различных систем и

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

УКАЗАТЕЛИ

**Указатель статей и кратких сообщений,
опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика»
за 2024 г.**

Выпуск 1

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Панченко Е.Ю., Тохметова А.Б., Курлевская И.Д., Суриков Н.Ю., Чумляков Ю.И. Влияние микролегирования бором на мартенситные превращения и эластокалорический эффект в сплаве $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$	5
Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Соловьёва Ю.В., Старенченко В.А. Особенности формирования ультрамелкозернистой структуры в технически чистом никеле под влиянием равноканального углового прессования	15
Майер Г.В. Шаровая молния. Модель «мыльного пузыря».....	25
Буслович Д.Г., Алексенко В.О., Корниенко Л.А., Хе Ч., Панин С.В. Влияние материала матрицы и схемы трибоконтакта на антифрикционность композитов ПИ и ПЭИ с политетрафторэтиленом	30
Смолин А.Ю., Еремина Г.М. Моделирование влияния шероховатости контактных поверхностей на риск асептического расшатывания при эндопротезировании	40
Чепак-Гизбрехт М.В., Князева А.Г. Оценка глубины окисления TiAl вследствие зернограничной диффузии кислорода	47
Кашаров Е.Б., Мурашкина Т.Л., Кроткевич Д.Г., Копцев М., Лидер А.М. Микроструктура и фазовый состав многокомпонентных сплавов Nb–Ni–Ti–Zr–Co	55

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Кудинов В.А., Трубицын К.В., Гаврилова Т.Е., Колотилкина К.В., Котова Е.В., Ткачев В.К. Формирование нестационарного профиля скорости в плоском канале	63
Гладков С.О. К вопросу о силе сопротивления раскаленного шара.....	73

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Басырова Д.В., Горбатов С.А., Харламов В.А., Цыгвинцев П.Н., Петрухина Д.И., Меджидов И.М., Глущенко Н.В., Тихонов В.Н., Иванов И.А. Оценка окислительного эффекта нетермальной аргоновой плазмы на поверхность ферросульфатного дозиметра.....	82
Радченко В.И. Методика определения радиационных потерь в прозрачной плазме с произвольной конфигурацией.....	89

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Бреев А.И., Васильев К.В., Шаповалов А.В. Расширение симметрий и обобщенные инвариантно-групповые решения уравнения теплопроводности и уравнения Бюргерса	99
Кречет В.Г., Ошурко В.Б., Киссер А.Э. О свойствах стационарных распределений самогравитирующего массивного и нелинейного спинорных полей	109

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Егоров Е.В., Егоров В.К., Корневский Е.Л. Недеструктивный количественный элементный анализ поверхности материалов	120
Корепанов В.И., Гэ Гуанхуэй. Кинетика люминесценции кислородных центров в LiF–TiO ₂	126

Выпуск 2

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Диб Х., Лозовой К.А., Коханенко А.П. Расчет характеристик лавинных фотодиодов Ge/Si на длину волны 850 нм.....	5
--	---

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Ципилев В.П., Олешко В.И., Яковлев А.Н., Форат Е.В., Гречкина Т.В. Влияние длины волны лазерного излучения на пороги инициирования энергетических материалов.....	14
---	----

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Беляев Б.А., Волошин А.С., Ходенков С.А., Галеев Р.Г. Наклонное падение электромагнитной волны на плоский резонатор из двух диэлектрических слоев с субволновыми решетками полосковых проводников на границах	25
---	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Шаповалов А.В., Кулагин А.Е., Синюков С.А. Невязка квазиклассически сосредоточенных решений кинетического уравнения на примере нелокальной модели ионизации активной среды	36
Абдуллаев С.К., Годжаев М.Ш. Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. I	45
Тимошкин А.В. Голографическое описание поздней Вселенной на основе обобщенной энтропии	55

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Павленко В.И., Романюк Д.С., Кашибадзе В.В., Ручий А.Ю., Форова Е.В. Исследования радиационно-защитных свойств многокомпонентного композиционного материала с использованием источников ^{207}Bi , ^{137}Cs , ^{60}Co	60
Попова Н.А., Громов В.Е., Никоненко Е.Л., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Шляров В.В., Крюков Р.Е. Оценка механизмов упрочнения, формирующих предел текучести в заэвтектоидной стали	70
Тихонов И.Д., Смирнов А.В., Тюнтеров Е.С. Исследование газочувствительных свойств нанокристаллических пленок	83
Таловская А.А., Моховиков Д.М., Барбин Е.С., Кулинич И.В., Гуляева А.А. Исследование механических параметров чувствительного элемента резонансно-частотного датчика давления	91

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Кизириди П.П., Озур Г.Е., Шнайдер А.В. Электронно-оптическое наблюдение свечения плазмы в сильноточном диоде со взрывоэмиссионным катодом на базе вакуумных дуг	101
---	-----

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Тельминов Е.Н., Бердыбаева Ш.Т., Солодова Т.А. Генерационные характеристики активного полимерного волновода с борфторидными комплексами дипиррометенов	107
Лукин В.П. Прогноз фазовых флуктуаций оптических волн в турбулентной атмосфере на основе текущих данных	114

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Тимофеев В.С., Гордиенко А.Б., Басалаев Ю.М. Исследование структуры и особенностей химической связи тройных соединений бериллия Be_2N_A ($A = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) с использованием функций Ванье	124
---	-----

ПЕРСОНАЛИЯ

Памяти Владислава Гавриловича Багрова	128
---	-----

Выпуск 3**ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ**

Стариков В.И., Михайленко С.Н. Анализ коэффициентов уширения линий молекул H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O и D_2^{18}O давлением воздуха и азота	5
Белибихин С.В., Конобеева Н.Н. Влияние полимера на распространение предельно коротких оптических импульсов в углеродных нанотрубках с учетом многофотонного поглощения	14

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Степанов Н.П., Иванов М.С., Степанова Л.Э. Закономерности поведения температурных зависимостей коэффициента Холла и удельной электропроводности кристаллов твердых растворов $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$ ($0 < x < 2$) в интервале 78–297 К	20
---	----

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Демин В.А., Петухов М.И. Об аналитическом решении уравнений переноса при описании ионного пограничного слоя в задаче протонного обмена	28
Гладков С.О., Нагибин Н.С. К вопросу аналитического определения наилучшей формы обтекания тел в вязком континууме	39
Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Рейно В.В., Хасанов И.Р., Колесников И.А., Лобода Ю.А., Базаров Д.Д. Комбинированный подход в тушении очага горения растительных горючих материалов	53

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Абдуллаев С.К., Годжаев М.Ш. Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. II	61
Овсенёв А.Е., Смольников Н.В., Гладких М.В., Аникин М.Н., Лебедев И.И., Наймушин А.Г., Каныгин В.В., Каныгин Н.В., Кичигин А.И., Пахомова Е.Е. Расчетно-экспериментальное измерение плотности потока нейтронов и мощности дозы γ -излучения на реакторе ИРТ-Т для проведения нейтрон-захватной терапии	74
Гордиенко А.Б., Коробко К.В. Вычисление сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна	82

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Ахметшин Л.Р., Иохим К.В., Казанцева Е.А., Смолин И.Ю. Эффективные механические свойства двумерного тетрахирального метаматериала	90
Грабко Г.И. Сравнительный анализ поляризационных процессов в композитных составах на основе поликристаллического ортопльомбата свинца	100
Барышников С.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В. Нелинейные диэлектрические свойства нитрата рубидия и нанокompозитов на его основе	107
Тагиев М.М., Абдуллаева И.А. Влияние γ -радиации на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0,85}\text{Sb}_{0,15}$, легированных акцепторной примесью свинца	115

Выпуск 4

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Игнатьев Ю.Г., Самигуллина А.Р. Исследование полной модели космологической эволюции классического скалярного поля с Хиггсовым потенциалом. IV. Масштабные преобразования модели	5
---	---

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Митрофанов А.Ю., Ильякова Н.Н., Руссаков Д.М., Тупицын А.В., Дягилев Д.В., Адуев Б.П. Оксид молибдена (VI) как фотохимический сенсibilизатор оптического зажигания энергетических материалов	20
Коровин Е.Ю., Качалов А.С., Гладков Ю.Н., Суляев В.И. Исследование структурных и электромагнитных свойств композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок для целей электромагнитной совместимости	29
Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Влияние конической головной части цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама на высокоскоростное взаимодействие со стальной преградой	35
Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Серебрякова А.А., Перегудов О.А., Жиркова Е.Н. Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура рельсов из заэвтектидной стали после эксплуатации	40
Бобуёк С., Суржигов А.П., Николаев Е.В., Власов В.А., Лысенко Е.Н. Влияние механического измельчения на структуру и магнитный фазовый переход никель-цинковых феррошпинелей	51

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Ферромагнитный нитрид галлия, легированный примесями редкоземельных элементов, в качестве материала для спинтроники	59
--	----

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Безлепкина Н.П., Чайковская О.Н., Бочарникова Е.Н., Соломонов В.И., Макарова А.С. Исследование трансформации хлорамфеникола под действием УФ-излучения и электронного пучка	73
Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Формирование преломленной и отраженной электромагнитных волн метаповерхностями Панчратнама – Берри с точки зрения молекулярной оптики	84
Халитов К.Ф., Халитов Ф.Г. Дипольные и квадрупольные моменты ионов Э^{3+} молекул ЭХ_3 в кристаллическом и газообразном состояниях	91
Алексеев С.В., Лосев В.Ф. Обработка методов измерения расходимости излучения в лазерной системе THL-100	101

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Гладков С.О. К вопросу обобщения формулы Стокса	106
---	-----

Выпуск 5

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Жамус А.Я., Кузнецов А.Б., Ежов Д.М., Кох А.Е., Светличный В.А. Влияние допирования редкоземельными элементами на спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства кристалла $\text{NdSc}_3(\text{BO}_3)_4$	5
Юдин Н.Н., Зиновьев М.М., Подзывалов С.Н., Кузнецов В.С., Слонько Е.С., Габдрахманов А.Ш., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю. Просветляющие интерференционные оксидные покрытия среднего ИК-диапазона для полупроводниковых оптических подложек	15

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Джафаров Р.Г. Модельные уравнения Бете – Солпитера для амплитуды рассеяния хиггсовских скаляров с решениями	20
Павленко А.В., Гришечкин Ю.А., Капшай В.Н. Точные решения двумерного квазипотенциального уравнения с релятивистскими аналогами потенциала гармонического осциллятора	27

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Коковин А.О. Кинетическая теория расширения катодной плазмы в неоднородной геометрической конфигурации вакуумного диода..... 35

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Исследование влияния концентрации кобальтовой связки на проникающую способность карбидовольфрамовых ударников при высокоскоростном ударе в стальную мишень-свидетель..... 46
- Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В., Сахненко А.В. Диэлектрические свойства сегнетоэлектрика иодида диизопропиламмония, внедренного в молекулярные сита SBA-15..... 52
- Данилов Е.А., Хачатурян А.А., Гурова Е.М., Шишанов М.В. Теплоемкость и температурная стойкость высоконаполненных композиционных материалов природный графит – фенолформальдегидная смола 59
- Аникеев С.Г., Кафтаранова М.И., Ходоренко В.Н., Артюхова Н.В., Пахолкина С., Большевич Е.А., Рыжакова В.Г. Исследование структурных и физико-механических свойств модифицированных пористых материалов на основе TiNi..... 68
- Шулепов И.А., Наркевич Н.А., Буякова С.П. Влияние интенсивной деформационно-термической обработки на структуру и электронное строение Cr–Mn–N-стали..... 77
- Шмаков В.В., Буяков А.С., Буякова С.П. Трещиностойкость керамики $ZrB_2-SiC-TaB_2$ со структурой «композит в композите»..... 91
- Кузьминов Е.Д., Дербин А.Ю., Шугуров А.Р. Микроструктура и механические свойства покрытий Ti–Al–Ta–N, полученных методом сильнотоочного импульсного магнетронного распыления..... 100

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Коренков В.В., Гусев А.А., Тюрин А.И., Васюкова И.А., Юнак М.А., Головин Ю.И. Вязкоупругие свойства древесины бука, выявляемые методом динамического механического анализа..... 108

Выпуск 6

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Радченко А.В., Радченко П.А., Саммель А.Ю., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Исследование взаимодействия удлинённых ударников из тяжелого сплава с легкосплавными преградами при низкоскоростном ударе..... 5
- Тягунов А.Г., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Вандышева И.В., Мушников В.С., Зайцева Н.А. О кластерной структуре никель-алюминиевых расплавов 11
- Ахундова Н.М., Алиева Т.Д. Электрические свойства структур металл – $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te<Pb>$ 17
- Гынгазов С.А., Васильев И.П., Болтуева В.А., Власов В.А., Насырбаев А. Синтез высокоэнтропийной керамики $(Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_3Al_5O_{12}$ для теплозащитных покрытий..... 24
- Воронцов А.В., Утяганова В.Р., Зыкова А.П. Влияние ударной обработки в разных частотных диапазонах на эволюцию структурно-фазового состояния поверхности перлитной стали 32
- Еремина Г.М., Смолин А.Ю., Мартышина И.П. Численное исследование ударно-волнового нагружения на условия для деактивации клеток рака..... 39
- Еремина Г.М., Смолин А.Ю. Моделирование ударно-волнового нагружения сегмента грудного отдела позвоночника, пораженного остеосаркомой..... 44
- Еремина М.О., Бакеев Р.А., Зимина В.А., Чирков А.О., Пажин А., Стефанов Ю.П. Численный анализ влияния диаметра и длины скважины на режимы истечения газа при предварительной дегазации угольного пласта..... 50

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Джахангирли З.А., Амирасланов И.Р., Рахимли А.Б., Сендов Р.Г., Байрамова Т.О. *Ab initio* и экспериментальное исследование электронных и оптических свойств $GaInS_3$ 57
- Ерина М.В., Дерябин М.И. Определение населенности триплетного состояния молекул акцептора по изменению интенсивности сенсibilизированной фосфоресценции 63
- Бобров П.П., Костычев Ю.А., Родионова О.В. Использование компактных векторных анализаторов параметров цепей для измерения диэлектрической проницаемости почв 71

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Зарипов Р.Г. Соотношения неопределенностей с высшими центральными моментами для квантовых систем 81

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Уринова К.К., Касымов Ф.У. Размерное квантование в полупроводниках в трехзонном приближении Кейна..... 87

ПЕРСОНАЛИЯ

- К 85-летию профессора Валентина Натановича Брудного 98

Выпуск 7

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Мурадян А.Ж., Бадалян Д.А. Спин-зависимое многоканальное туннелирование электрона в квантовой проволоке в продольном магнитном поле.....5

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П., Кутырев Г.Ю. Влияние эффектов размерного квантования на эффективную массу основных носителей заряда в светодиодных гетероструктурах с множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 15
- Сидоров Ю.Г., Якушев М.В., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Васильев В.В., Зверев А.В., Макаров Ю.С., Бударных В.И., Марчишин И.В., Марин Д.В., Семенов М.П., Предин А.В., Вишняков А.В., Варавин В.С., Ремесник В.Г., Смолянин А.В., Сизиков П.В., Давыдова Е.О. Средневолновые ФПУ форматом 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе слоев HgCdTe , выращенных методом МЛЭ на кремниевых подложках.....26

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Кроткевич Д.Г., Кашкаров Е.Б., Лидер А.М. Влияние длительности искрового плазменного спекания на структурно-фазовое состояние и механические свойства ламинированных композитов на основе $\text{Ti}_3\text{Al}(\text{Si})\text{C}_2/\text{Nb}$36
- Иржевский К.А., Клепиков И.В., Лебедев В.Ф., Колядин А.В. Морфология кратеров, образованных на поверхности алмазных пластин при воздействии сфокусированного лазерного излучения44
- Кудряшова О.Б., Соколов С.Д., Ворожцов А.Б. Эволюция адсорбирующего аэрозоля, генерированного импульсным способом50
- Хидиров И., Парпиев А.С. Нейтронографическое исследование образования дальнего порядка в карбиде титана $\text{TiC}_{0.60}$ 61
- Богданов А.А., Панин С.В., Любутин П.С., Остапенко М.Г. Развитие циклической ползучести при блочном нагружении полукристаллического ПЭЭК.....68
- Каспарян С.О., Бакулин А.В., Кулькова С.Е. Механические свойства тройных сплавов состава $\text{XY}_3\text{Ti}_{11}$77

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Жуковский К.В. Аналитическое исследование влияния характеристик пучка и поля ондулятора на излучение лазера на свободных электронах.....86
- Савинов К.Н., Столярова Л.Р., Котина Д.М., Дмитриев А.К. Влияние параметров модуляции излучения диодного лазера на характеристики резонансов КПП при многочастотном возбуждении97

Выпуск 8

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Синюков С.А., Кулагин А.Е., Шаповалов А.В. Динамическая система моментов для нелокального уравнения Фишера – Колмогорова – Петровского – Пискунова с дробной производной по времени в приближении слабой диффузии.....5

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

- Давыдов В.В., Гольдберг А.А., Проводин Д.С., Давыдов Р.В., Дудкин В.И. Новый метод формирования структуры линии нутации в ядерно-магнитных расходомерах-релаксометрах для различных режимов течения жидких сред15
- Ветлужский А.Ю. Ослабление приповерхностных электромагнитных полей магнитодиэлектрическими покрытиями.....30

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Юдин Н.Н., Слюнько Е.С., Подзывалов С.Н., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю., Власов Д.В., Габдрахманов А.Ш. Разработка дихроичного зеркала на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ для ЛИДАРных систем41
- Валиулина Л.И., Черепанов В.Н., Валиев Р.Р. Динамические электрическая и магнитная поляризуемости конформаций [28]гексафирина48

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Грабко Г.И., Батухтин А.Г. Анализ особенностей энергетического спектра локализованных состояний композитного состава на основе тонких слоев тетраоксида свинца59
- Выродова А.В., Киреева И.В., Чумляков Ю.И. Влияние двойникования и γ - ϵ -мартенситного превращения на механические и функциональные свойства монокристаллов CrMnFeCoNi высокоэнтропийных сплавов66
- Новицкая О.С., Лычагин Д.В., Филиппов А.В., Семенчук Н.В., Сизова О.В. Морфология деформационного рельефа в сплавах на основе железа и марганца при скретч-тестировании79

Назаренко Н.Н., Князева А.Г. Физические особенности фильтрации двухфазной биологической жидкости в цилиндрической поре	86
Севостьянова И.Н., Савченко Н.Л. Влияние контактного трения между торцевыми поверхностями образцов и опорами испытательной машины на деформационное поведение высокопористой диоксидциркониевой керамики в условиях квазистатического одноосного сжатия	94

Выпуск 9

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Ферромагнитный нитрид галлия, легированный марганцем, в качестве материала для спинтроники	5
--	---

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Демкин В.П., Мельничук С.В., Светлик М.В., Акинина М.Д., Руденко Т.В., Алифирова В.М., Гребенюк О.В., Смаглий Л.В., Демкин О.В. Прохождение электрических сигналов через ткани вестибулярного органа при стимулировании отолитовых мембран	20
Ивченко В.А. Полевая ионная микроскопия интерфейсов в сплаве ЖСЗ6-ВИ	31
Аникеев С.Г. Особенности создания порошкового пористо-монокристаллического материала на основе TiNi с помощью реакционно-диффузионного спекания и электронно-пучковой обработки	39
Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Саммель А.Ю., Ткачев Д.А., Жуков И.А., Ахмадеев Ю.Х., Шугуров В.В., Ажажа И.И. Влияние антифрикционных покрытий системы Al-Mg-B на высокоскоростное взаимодействие ударников из тяжелого сплава с алюминиевой преградой	48
Русин Н.М., Скоренцев А.Л. Влияние свинца на структуру и механические свойства спеченного сплава Al-40Sn	57
Турсунханова Р.Б., Сергеев В.П., Калашников М.П., Сергеев О.В., Воронов А.В., Христенко Ю.Ф., Жалнин Е.В. Влияние прозрачных пленок на основе Ta, Si, Al, N на локальные повреждения поверхности кварцевых пластин при воздействии высокоскоростного потока микрочастиц	66
Вовнова И.Г., Липатникова Я.Д., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. 3D-моделирование дефектной субструктуры в объеме металлического монокристалла при растяжении	75

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Гладков С.О., Зо Аунг. О выводе формулы Стокса с учетом проскальзывания	84
--	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Фисанов В.В. Поверхностные волны на границе плазменного метаматериала и вакуума в геометрической конфигурации Фойгта	90
---	----

Выпуск 10

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Исаев А.А., Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Шиканов А.Е. Моделирование нейтронного генератора на основе лазерно-плазменного диода с магнитной изоляцией	5
Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. Влияние частоты следования импульсов на формирование плазменных диффузных струй при давлении воздуха 1 Торр	17

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Лепяев А.Н., Ксенофонтов С.И., Васильева О.В., Алимов К.К. Экспериментальные исследования вязких течений при движении горящих металлических частиц в продуктах сгорания конденсированных систем	23
--	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Кречет В.Г., Ошурко В.Б., Киссер А.Э. Эффекты динамики спиновых частиц в однородном стационарном пространстве-времени с вращением и о возможной адекватности вращающейся электромеханической модели электрона	32
--	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Сизова О.В., Колубаев А.В. Формирование структуры сплава при сварке трением с перемешиванием	40
Журавлев Ю.Н. Структурные, упругие, пьезоэлектрические и оптические свойства $Pb_2(BO_3)X$ (X: Cl, Br, I, NO_3) из первых принципов	47
Левин Ю.К. Механизм стабильности нанопузырей в воде	58
Кошоридзе С.И. Влияние заряда на стабильность поверхностных нанопузырьков	62
Черепанов Д.Н. Моделирование консервативного движения порогов на винтовых дислокационных сегментах	67
Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Сараева А.А., Выродова А.В., Победенная З.В., Куксгаузен Д.А. Эффект памяти формы при ГЦК \leftrightarrow ГПУ-мартенситном превращении в монокристаллах $Cr_{20}Fe_{20}Mn_{20}Co_{35}Ni_5$ высокоэнтропийного сплава с оксидными частицами	79

- Кривин Н.Н., Понамарев Д.Е., Шипуля М.А.** Резонансное поглощение электромагнитного излучения упорядоченным массивом проводящих элементов со спиральной симметрией88

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Лукин И.П.** Распределение когерентности в поперечном сечении частично когерентного безвихревого бessel-гауссова пучка92

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Басалаев Ю.М., Басалаева О.Г.** Динамика решетки и упругие свойства пниктидов $BePbX_2$ ($X = N, P, As, Sb$)102

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Михайлов М.М., Юрьев С.А., Лапин А.Н., Федосов Д.С., Горончко В.А., Артищев С.А., Труфанова Н.С.** Изменение оптических свойств при облучении квантами солнечного спектра пасты ПДЗП-ГП107

Выпуск 11

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Миньков Л.Л., Оберемок А.А.** Течение Куэтта между боковыми стенками закрытого канала и движущегося в нем вытянутого тела5
- Кириллова К.И., Бондарева Н.С.** Численное исследование влияния процесса плавления в стенке на конвективный теплообмен в замкнутой воздушной полости13
- Порязов В.А., Глотов О.Г., Крайнов Д.А., Сорокин И.В., Суродин Г.С.** Моделирование горения конденсированных высокоэнергетических материалов, содержащих порошкообразный алюминий. I. Эксперимент25

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Юдин Н.Н., Слюнько Е.С., Подзывалов С.Н., Габдрахманов А.Ш., Кальсин А.Ю., Лысенко А.Б., Кулеш М.М., Садовников С.А., Яковлев С.В.** Узкополосные фильтры ближнего ИК-диапазона для систем дистанционного газодиагностики43
- Землянов А.А., Донченко В.А., Землянов Ал.А., Кочетов Д.И., Кравченко И.В., Рямбов Р.В.** Угловое распределение одно- и двухфотонно-возбужденной флуоресценции жидко-капельного аэрозоля с красителем Родамин 6Ж при возбуждении наносекундными лазерными импульсами51
- Осипов В.В., Шитов В.А., Максимов Р.Н., Щукина А.А.** Седиментация наночастиц $Yb:Y_2O_3$, синтезированных лазерным методом, и особенности изготовления оптической керамики на их основе56

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Карпенко М.П., Купцов И.С., Уварова А.А.** Влияние неопределенности нейтронных данных на точность расчета критических параметров размножающихся сред с метастабильным америцием 24264

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В.** Ферромагнитный нитрид галлия, легированный примесями переходных элементов, в качестве материала для спинтроники74

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Корчагин В.Н., Сысоев И.А., Пашенко А.С., Ратушный В.И.** Влияние углеродных квантовых точек в матрице поливинилбутирала на электрофизические свойства солнечных элементов84
- Белослудцева А.А., Бобенко Н.Г., Сапежинская Т.А.** ТермоЭДС графена: роль примесных атомов и структурного беспорядка92
- Кузьминов Е.Д., Шугуров А.Р., Дербин А.Ю., Панин А.В., Дмитриев А.И.** Влияние содержания Si в покрытиях $Ti-Al-Ta-Si-N$ на их разрушение при одноосном растяжении97
- Еремина Г.М., Мартышина И.П.** Влияние толщины костного цемента на процессы остеоинтеграции эндопротеза тазобедренного сустава. Макроскопическое моделирование107

Выпуск 12

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Трофимов М.С., Щербаков И.Д.** Динамика формирования импульсов дырочной составляющей фототока в сенсорах ионизирующих излучений на основе арсенида галлия, компенсированного хромом7
- Конради Д.С., Средин В.Г.** Оценка влияния внеполевой засветки на функционирование оптико-электронных систем на основе полупроводниковых матричных фотоприемников инфракрасного диапазона16

Тимофеев В.А., Скворцов И.В., Машанов В.И., Первалов Т.В., Исламов Д.Р., Азаров И.А., Ярошевич А.С. Изучение спектральных зависимостей показателя поглощения слоев GeSn и GeSiSn различного состава, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии	22
---	----

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Чайковская О.Н., Базыль О.К., Бочарникова Е.Н., Безлепкина Н.П., Майер Г.В. Спектрально-люминесцентные свойства и природа электронно-возбужденных состояний парацетамола в воде	31
Соснин Э.А., Сорокин Д.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Печеницин Д.С. О возможном механизме буферного зашелаживания природных вод, подвергнутых действию импульсного высоковольтного разряда	40
Корюкина Е.В. Моделирование профилей линий спектров благородных газов, возбуждаемых терагерцовыми электрическими полями	46
Курцевич А.Е., Валиев Р.Р., Черепанов В.Н. Внутренняя конверсия между двумя возбужденными электронными состояниями в производных порфирина	56
Макашев Д.Р., Расопин Г.К., Паулиш А.Г., Кистенев Ю.В. Система для исследования пространственного распределения ТГц-излучения	62

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Беличенко В.П., Буянов Ю.И., Дымов Г.А., Мироньчев А.С., Запасной А.С., Горст А.В. Характеристические моды в теории плоских и объемных сверхширокополосных антенн	70
Багуля А.В., Гришин В.М., Иванченко В.Н., Чалый Н.А. Новая Geant4 база данных по адронным сечениям нейтронов и легких ионов	80
Бернгардт А.Е., Ерофеев Д.В., Борщ В.Н. Разработка L2-концентратора для эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA	85

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Порязов В.А., Крайнов Д.А., Глотов О.Г. Моделирование горения конденсированных высокоэнергетических материалов, содержащих порошкообразный алюминий. II. Модель	91
Гареев Т.И., Богомолова А.И., Горкуша А.С., Суляева В.С., Зайцев О.В., Нерушев О.А., Сорокин Д.В., Смовж Д.В. Синтез и свойства композита на основе CVD-графена и оксида олова, полученного методом магнетронного распыления	99
Яковенко С.Н. Управление теплопереносом в импактной струе с решеткой на входе	109
Колесова А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А. Исследование эффективности охлаждения криволинейной поверхности при сверхзвуковом и дозвуковом течении основного потока	117
Дектерев Ар.А., Сентябов А.В., Дектерев А.А., Дектерев Д.А. Влияние геометрических особенностей модели циклоидального ротора на точность расчета тягово-энергетических характеристик	125
Елагин И.А., Ягодин Г.С., Чирков В.А. Особенности электрокоалесценции незаряженной капли со слоем воды в переменном электрическом поле	132
Архипов В.А., Басалаев С.А., Костюшин К.В., Лобода Е.Л., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Усанина А.С. Моделирование сброса жидкого хладагента при авиационном тушении пожаров	140
Кудряшова О.Б., Грузнов В.М., Соколов С.Д., Ворожцов А.Б., Михайлов Ю.М. Математическое моделирование в задаче обнаружения паров взрывчатых веществ от источника в почве	150
Дубкова Я.А., Ткачев Д.А., Верхошанский Я.Ю., Бельчиков И.А., Жуков А.С., Жукова Т.В. Твердые горючие материалы с металлическими добавками, полученные методом 3D-печати	161

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Локтионова И.В., Кузьменко А.П., Абакумов П.В. Наноструктурирование ленточных пленок нитрида бора	171
Абдульменова Е.В., Буякова С.П. Сорбция и десорбция водорода порошком Ti-Ni, легированным титаном	179
Соловьева Ю.В., Вовнова И.Г., Липатникова Я.Д., Геттингер М.В., Пантюхова О.Д. EBSD-исследование высокотемпературной макролокализации деформации монокристаллов Ni ₃ Ge в условиях ползучести	186
Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Куксгаузен Д.А., Выродова А.В., Сараева А.А. ГЦК↔ГПУ-мартенситное превращение и эффект памяти формы в монокристаллах CrFeMnCoNi высокоэнтропийного сплава при твердо-растворном упрочнении атомами углерода	193
Попова Н.А., Никоненко Е.Л., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Влияние интенсивной пластической деформации на зеренную структуру и фазовый состав технически чистой УМЗ-меди	201

УКАЗАТЕЛИ

Указатель статей и кратких сообщений, опубликованных в журнале «Известия вузов. Физика» за 2024 г.	209
Именной указатель журнала «Известия вузов. Физика» за 2024 г.	217

**Именной указатель
журнала «Известия вузов. Физика»
за 2024 г.***

А

Абакумов П.В., 12
Абдуллаев С.К., 2, 3
Абдуллаева И.А., 3
Абдульменова Е.В., 12
Авакянц Л.П., 7
Авербух Б.Б., 4
Авербух И.Б., 4
Агафонцев М.В., 3
Адуев Б.П., 4
Ажажа И.И., 9
Азаров И.А., 12
Акинина М.Д., 9
Алексеев С.В., 4
Алексенко В.О., 1
Алиева Т.Д., 6
Алимов К.К., 10
Алифирова В.М., 9
Амирасланов И.Р., 6
Андреанов А.А., 11
Андреанова О.Н., 11
Аникеев С.Г., 5, 9
Аникин М.Н., 3
Артишев С.А., 10
Артюхова Н.В., 5
Архипов В.А., 12
Ахмадеев Ю.Х., 9
Ахметшин Л.Р., 3
Ахундова Н.М., 6

Б

Багуля А.В., 12
Бадалян Д.А., 7
Базаров Д.Д., 3
Базыль О.К., 12
Байрамова Т.О., 6
Бакеев Р.А., 6
Бакулин А.В., 7
Бакшт Е.Х., 10
Барбин Е.С., 2
Барышев Е.Е., 6
Барышников С.В., 3, 5
Басалаев С.А., 12
Басалаев Ю.М., 2, 10
Басалаева О.Г., 10
Басырова Д.В., 1
Батуев С.П., 6
Батухтин А.Г., 8
Безлепкина Н.П., 4, 12
Белибихин С.В., 3

Беличенко В.П., 12
Белослудцева А.А., 11
Бельчиков И.А., 12
Беляев Б.А., 2
Бердыбаева Ш.Т., 2
Бернгардт А.Е., 12
Бобенко Н.Г., 11
Бобров П.П., 6
Бобуёк С., 4
Богданов А.А., 7
Богомолова А.И., 12
Болтуева В.А., 6
Большевич Е.А., 5
Бондарева Н.С., 11
Борщ В.Н., 12
Бочарникова Е.Н., 4, 12
Бреев А.И., 1
Бударных В.И., 7
Буркин В.В., 4, 5, 6
Бурмистров Е.Р., 7
Буслович Д.Г., 1
Буяков А.С., 5
Буякова С.П., 5*, 12
Буянов Ю.И., 12

В

Валиев Р.Р., 8, 12
Валиулина Л.И., 8
Вандышева И.В., 6
Варавин В.С., 7
Васильев В.В., 7
Васильев И.П., 6
Васильев К.В., 1
Васильева О.В., 10
Васюкова И.А., 5
Веретенников С.В., 12
Верхошанский Я.Ю., 12
Ветлужский А.Ю., 8
Виноградов Н.П., 10
Вишняков А.В., 7
Власов В.А., 4, 6
Власов Д.В., 8
Вовнова И.Г., 9, 12
Вовченко Е.Д., 10
Волошин А.С., 2
Ворожцов А.Б., 7, 12
Воронов А.В., 9
Воронцов А.В., 6
Выродова А.В., 8, 10, 12

Г

Габдрахманов А.Ш., 5, 8, 11
Гаврилова Т.Е., 1

Галеев Р.Г., 2
Гареев Т.И., 12
Геттингер М.В., 12
Гладких М.В., 3
Гладков С.О., 1, 3, 4, 9
Гладков Ю.Н., 4
Глотов О.Г., 11, 12
Глущенко Н.В., 1
Годжаев М.Ш., 2, 3
Головин Ю.И., 5
Гольдберг А.А., 8
Горбатов С.А., 1
Гордиенко А.Б., 2, 2
Горкуша А.С., 12
Горончко В.А., 10
Горст А.В., 12
Грабко Г.И., 3, 8
Гребенюк О.В., 9
Гречкина Т.В., 2
Гришечкин Ю.А., 5
Гришин В.М., 12
Грозов В.Е., 2, 4
Грузнов В.М., 12
Гуляева А.А., 2
Гурова Е.М., 5
Гусев А.А., 5
Гынгазов С.А., 6
Гэ Гуанхуэй, 1

Д

Давыдов В.В., 8
Давыдов Р.В., 8
Давыдова Е.О., 7
Данилов Е.А., 5
Дектерев А.А., 12
Дектерев Ар.А., 12
Дектерев Д.А., 12
Демин В.А., 3
Демкин В.П., 9
Демкин О.В., 9
Дербин А.Ю., 5, 11
Дерябин М.И., 6
Джафаров Р.Г., 5
Джахангирли З.А., 6
Диб Х., 2
Дмитриев А.И., 11
Дмитриев А.К., 7
Донченко В.А., 11
Дубкова Я.А., 12
Дудкин В.И., 8
Дымов Г.А., 12
Дьячковский А.С., 4, 5, 6, 9

Дягилев Д.В., 4

Е

Евдокимов О.А., 12
Егоров В.К., 1
Егоров Е.В., 1
Ежов Д.М., 5
Елагин И.А., 12
Еремин М.О., 6
Еремина Г.М., 1, 6*, 11
Ерина М.В., 6
Ерофеев Д.В., 12

Ж

Жалнин Е.В., 9
Жамус А.Я., 5
Жиркова Е.Н., 4
Жуков А.С., 12
Жуков И.А., 9
Жукова Т.В., 12
Жуковский К.В., 7
Журавлев Ю.Н., 10

З

Зайцев О.В., 12
Зайцева Н.А., 6
Запасной А.С., 12
Зарипов Р.Г., 6
Зверев А.В., 7
Землянов А.А., 11
Землянов Ал.А., 11
Зимина В.А., 6
Зиновьев М.М., 5, 8, 11
Зо Аунг, 9
Зыкова А.П., 6

И

Иванов И.А., 1
Иванов М.С., 3
Иванов Ю.Ф., 2, 4
Иванченко В.Н., 12
Ивонин И.В., 4, 9, 11
Ивченко В.А., 9
Игнатъев Ю.Г., 4
Ильякова Н.Н., 4
Иохим К.В., 3
Иржевский К.А., 7
Исаев А.А., 10
Исламов Д.Р., 12
Ищенко А.Н., 4, 5, 6, 9

* Более одной статьи в номере.

- К**
 Казанцева Е.А., 3
 Калашников М.П., 9
 Кальсин А.Ю., 11
 Кальсин А.Ю., 5, 8
 Каньгин В.В., 3
 Каньгин Н.В., 3
 Капшай В.Н., 5
 Карпенко М.П., 11
 Каспарян С.О., 7
 Касымов Ф.У., 6
 Кафгаранова М.И., 5
 Качалов А.С., 4
 Кашибадзе В.В., 2
 Кашкаров Е.Б., 1, 7
 Кизириди П.П., 2
 Киреева И.В., 8, 10, 12
 Кириллова К.И., 11
 Киссер А.Э., 1, 10
 Кистенев Ю.В., 12
 Кичигин А.И., 3
 Клепиков И.В., 7
 Князева А.Г., 1, 8
 Кожевников В.Ю., 5
 Козловский К.И., 10
 Козырев А.В., 5
 Коковин А.О., 5
 Колесников И.А., 3
 Колесова А.А., 12
 Колотилкина К.В., 1
 Колубаев А.В., 10
 Колядин А.В., 7
 Конобеева Н.Н., 3
 Конради Д.С., 12
 Копцев М., 1
 Корневский Е.Л., 1
 Коренков В.В., 5
 Корепанов В.И., 1
 Корниенко Л.А., 1
 Коробко К.В., 3
 Коровин Е.Ю., 4
 Корчагин В.Н., 11
 Корякина Е.В., 12
 Костычев Ю.А., 6
 Костюшин К.В., 12
 Котина Д.М., 7
 Котова Е.В., 1
 Кох А.Е., 5
 Коханенко А.П., 2
 Кочетов Д.И., 11
 Кошоридзе С.И., 10
 Кравченко И.В., 11
 Крайнов Д.А., 11, 12
 Кречет В.Г., 1, 10
 Кривин Н.Н., 10
 Кроткевич Д.Г., 1, 7
 Крюков Р.Е., 2
 Ксенофонов С.И., 10
 Кудинов В.А., 1
 Кудрявцев В.А., 4, 5
 Кудряшова О.Б., 7, 12
- Кузнецов А.Б., 5**
 Кузнецов В.С., 5, 8, 11
 Кузьменко А.П., 12
 Кузьминов Е.Д., 5, 11
 Куксгаузен Д.А., 10, 12
 Кулагин А.Е., 2, 8
 Кулеш М.М., 11
 Кулинич И.В., 2
 Кулькова С.Е., 7
 Купцов И.С., 11
 Курлевская И.Д., 1
 Курцевич А.Е., 12
 Кутырев Г.Ю., 7
- Л**
 Лапин А.Н., 10
 Лебедев В.Ф., 7
 Лебедев И.И., 3
 Левин Ю.К., 10
 Лепавев А.Н., 10
 Лидер А.М., 1, 7
 Липатникова Я.Д., 9, 12
 Лобода Е.Л., 3, 12
 Лобода Ю.А., 3
 Лозовой К.А., 2
 Локтионова И.В., 12
 Лосев В.Ф., 4
 Лукин В.П., 2
 Лукин И.П., 10
 Лысенко А.Б., 5, 8, 11
 Лысенко Е.Н., 4
 Лычагин Д.В., 8
 Любутин П.С., 7
- М**
 Майер Г.В., 1, 12
 Макаров Ю.С., 7
 Макарова А.С., 4
 Макашев Д.Р., 12
 Максимов Р.Н., 11
 Марин Д.В., 7
 Мартышина И.П., 6, 11
 Марчишин И.В., 7
 Матвиенко О.В., 12
 Машанов В.И., 12
 Меджидов И.М., 1
 Мельничук С.В., 9
 Милинский А.Ю., 3, 5
 Миньков Л.Л., 11
 Мироньев А.С., 12
 Митрофанов А.Ю., 4
 Михайленко С.Н., 3
 Михайлов М.М., 10
 Михайлов Ю.М., 12
 Моховиков Д.М., 2
 Мурадян А.Ж., 7
 Мурашкина Т.Л., 1
 Мушников В.С., 6
- Н**
 Нагибин Н.С., 3
 Назаренко Н.Н., 8
 Наймушин А.Г., 3
 Наркевич Н.А., 5
 Насырбаев А., 6
 Нерушев О.А., 12
 Николаев Е.В., 4
 Никоненко Е.Л., 1, 2, 12
 Новицкая О.С., 8
- О**
 Оберемок А.А., 11
 Овсенёв А.Е., 3
 Озур Г.Е., 2
 Олешко В.И., 2
 Осипов В.В., 11
 Остапенко М.Г., 7
 Ошурко В.Б., 1, 10
- П**
 Павленко А.В., 5
 Павленко В.И., 2
 Пажин А., 6
 Панарин В.А., 12
 Панин А.В., 11
 Панин С.В., 1, 7
 Пантюхова О.Д., 12
 Панченко Е.Ю., 1
 Парпиев А.С., 7
 Паулиш А.Г., 12
 Пахолкина С., 5
 Пахомова Е.Е., 3
 Пашенко А.С., 11
 Перевалов Т.В., 12
 Перегудов О.А., 4
 Перфильева К.Г., 12
 Петрухина Д.И., 1
 Петухов М.И., 3
 Печеницин Д.С., 12
 Победенная З.В., 10
 Подзывалов С.Н., 5, 8, 11
 Понамарев Д.Е., 10
 Попова Н.А., 1, 2, 4, 12
 Порфирьев М.А., 2, 4
 Порязов В.А., 11, 12
 Предин А.В., 7
 Проводин Д.С., 8
 Прудаев И.А., 4, 9, 11
- Р**
 Радченко А.В., 6
 Радченко В.И., 1
 Радченко П.А., 6
 Распопин Г.К., 12
 Расулов В.Р., 6
 Расулов Р.Я., 6
 Ратушный В.И., 11
 Рахимли А.Б., 6
 Рейно В.В., 3
- Ремесник В.Г., 7**
 Родионова О.В., 6
 Романдин В.И., 12
 Романюк Д.С., 2
 Руденко Т.В., 9
 Русин Н.М., 9
 Руссаков Д.М., 4
 Ручий А.Ю., 2
 Рыжакова В.Г., 5
 Рямбов Р.В., 11
- С**
 Сабинина И.В., 7
 Савинов К.Н., 7
 Савченко Н.Л., 8
 Садовников С.А., 11
 Самигуллина А.Р., 4
 Саммель А.Ю., 4, 5, 6, 9
 Сапезинская Т.А., 11
 Сараева А.А., 10, 12
 Сахненко А.В., 5
 Светлик М.В., 9
 Светличный В.А., 5
 Севостьянова И.Н., 8
 Сеидов Р.Г., 6
 Семенов М.П., 7
 Семенчук Н.В., 8
 Сентябов А.В., 12
 Сергеев В.П., 9
 Сергеев О.В., 9
 Серебрякова А.А., 4
 Сидоров Г.Ю., 7
 Сидоров Ю.Г., 7
 Сизиков П.В., 7
 Сизова О.В., 8, 10
 Синюков С.А., 2, 8
 Скакун В.С., 12
 Скворцов И.В., 12
 Скоренцев А.Л., 9
 Скосырский А.Б., 4, 5
 Слюнько Е.С., 5, 8, 11
 Смаглий Л.В., 9
 Смирнов А.В., 2
 Смовж Д.В., 12
 Смолин А.Ю., 1, 6*
 Смолин И.Ю., 3
 Смольников Н.В., 3
 Смолянин А.В., 7
 Соколов С.Д., 7, 12
 Соловьева Ю.В., 1, 9, 12*
 Солодова Т.А., 2
 Соломонов В.И., 4
 Сорокин Д.А., 12
 Сорокин Д.В., 12
 Сорокин И.В., 11
 Соснин Э.А., 12
 Средин В.Г., 12
 Старенченко В.А., 1, 9, 12
 Стариков В.И., 3
 Старосельцева А.А., 3
 Степанов Е.Ю., 4, 5, 6

Степанов Н.П., 3
Степанова Л.Э., 3
Стефанов Ю.П., 6
Столярова Л.Р., 7
Стукова Е.В., 3, 5
Суляева В.С., 12
Суржиков А.П., 4
Суриков Н.Ю., 1
Суродин Г.С., 11
Суляев В.И., 4
Сысоев И.А., 11

Т

Тагиев М.М., 3
Таловская А.А., 2
Тарасенко В.Ф., 10
Тельминов Е.Н., 2
Тимофеев В.А., 12
Тимофеев В.С., 2
Тимошкин А.В., 2
Тихонов В.Н., 1
Тихонов И.Д., 2
Ткачев В.К., 1
Ткачев Д.А., 9, 12
Толбанов О.П., 4, 9, 11
Тохметова А.Б., 1
Трофимов М.С., 12
Трубицын К.В., 1

Труфанова Н.С., 10
Тупицын А.В., 4
Турсунханова Р.Б., 9
Тюнтеров Е.С., 2
Тюрин А.И., 5
Тягунов А.Г., 6
Тягунов Г.В., 6

У

Уварова А.А., 11
Уринова К.К., 6
Усанина А.С., 12
Утяганова В.Р., 6

Ф

Федосов Д.С., 10
Филиппов А.В., 8
Фисанов В.В., 9
Форат Е.В., 2
Форова Е.В., 2

Х

Халитов К.Ф., 4
Халитов Ф.Г., 4
Харламов В.А., 1
Хасанов И.Р., 3
Хачатурян А.А., 5

Хе Ч., 1
Хидиров И., 7
Хлудков С.С., 4, 9, 11
Ходенков С.А., 2
Ходоренко В.Н., 5
Христенко Ю.Ф., 9

Ц

Ципилев В.П., 2
Цыгвинцев П.Н., 1

Ч

Чайковская О.Н., 4, 12
Чальый Н.А., 12
Чепак-Гизбрехт М.В., 1
Черепанов В.Н., 8, 12
Черепанов Д.Н., 10
Чирков А.О., 6
Чирков В.А., 12
Чумляков Ю.И., 1, 8, 10,
12
Чупашев А.В., 4, 5, 6

Ш

Шаповалов А.В., 1, 2, 8
Шиканов А.Е., 10
Шипуля М.А., 10

Шитов В.А., 11
Шишанов М.В., 5
Шляров В.В., 2
Шмаков В.В., 5
Шнайдер А.В., 2
Шугуров А.Р., 5, 11
Шугуров В.В., 9
Шулепов И.А., 5

Щ

Щербак И.Д., 12
Щукина А.А., 11

Ю

Юдин Н.Н., 5, 8, 11
Юнак М.А., 5
Юрьев С.А., 10

Я

Ягодин Г.С., 12
Яковенко С.Н., 12
Яковлев А.Н., 2
Яковлев С.В., 11
Якушев М.В., 7
Ярошевич А.С., 12

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 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 18.12.2024. Выпуск в свет 20.12.2024. Заказ № 6159.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 25.58. Уч.-изд. л. 28.64. 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

