

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Октябрь, 2025

№ 10 (815)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

Sheremet M.A. (Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Kozyrev A.V. (Deputy Editor-in-Chief), Professor, Tomsk, Russia
Permyakova L.V. (Executive Editor), Tomsk, Russia
Alekseenko S.V., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Aseev A.L., Academician RAS, Novosibirsk, Russia
Borisov A.V., Professor, Moscow, Russia
Varaksin A.Y., Academician RAS, Moscow, Russia
Vorozhtsov A.B., Professor, Tomsk, Russia
Voitsekhovskii A.V., Professor, Tomsk, Russia
Gitman D.M., Professor, São Paulo, Brazil
Demin V.A., Professor, Perm, Russia
Jafarov R.G., Professor, Baku, Republic of Azerbaijan
Ditenberg I.A., Professor, Tomsk, Russia
Ivonin I.V., Professor, Tomsk, Russia
Kistenev Y.V., Professor, Tomsk, Russia
Kovalevskaya T.A., Professor, Tomsk, Russia
Kolobov Y.R., Professor, Belgorod, Russia
Korotaev A.D., Professor, Tomsk, Russia
Mayer G.V., Professor, Tomsk, Russia
Manca Oronzio, Professor, Naples, Italy
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

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

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

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

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

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

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

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

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

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

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

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

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

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

CONTENTS

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Kashirsky D.E., Gorn D.I., Voitsekhovskii A.V.** Simulation of superlattice barrier for nBn structures based on $n\text{-HgCdTe}$ 5
- Burmistrov E.R., Avakyants L.P.** Modeling of terahertz pulse temporal profiles generated by photoconductive semiconductor antennas 14

PLASMA PHYSICS

- Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu.** Influence of the initial velocity of cathode plasma on electron and ion flow kinetics in vacuum discharge..... 26

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Korovin E.Yu., Kachalov A.S., Atamasov V.V., Pavlova A.A., Suslyayev V.I.** Electromagnetic properties of a composite material based on polyethylene and MWCNTs encapsulated with cobalt particles 34
- Starenchenko V.A., Solov'eva Yu.V., Vovnova I.G., Lipatnikova Ya.D.** Multilevel model of the autowave propagation of plastic deformation front..... 43
- Smirnov I.V., Ditenberg I.A.** Effect of introduced oxygen concentration on thermal stability of internally oxidized V–Cr–Zr alloy 51
- Bagiyeva G.Z., Ismayilov R.M.** Effect of heat treatment on thermal conductivity of PbTe single crystals with superstoichiometric lead 58

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

- Fisanov V.V., Zapasnoy A.S.** Field singularity on the edge in multisector structures with conducting faces..... 64
- Zhuravlev V.A., Sayidqulov R.Sh., Dotsenko O.A., Wagner D.V.** Magnetocrystalline anisotropy of the $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ hexaferrites system 72

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Lukin V.P.** Features of parameterization of non-Kolmogorov models of the turbulence spectrum 81
- Konobeeva N.N.** Influence of spatial heterogeneity of carbon nanotubes array in a polymer on the electromagnetic pulse propagation..... 89
- Eranov I.D., Yudin N.N., Antipov O.L., Slyunko E.S., Zinoviev M.M., Kuznetsov V.S., Vlasov D.V., Kulesh M.M., Podzyvalov S.N., Lysenko A.B., Kalsin A.Yu.** Single-resonator optical parametric oscillator based on ZGP single crystal with direct pumping by Tm:YLF laser radiation..... 96

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Bagrov A.R., Bashkirov E.K.** Dynamics of the fidelity and the negativity criterion for three-qubit Jaynes–Cummings model..... 101
- Paulenka A.V., Kapshai V.N., Grishechkin Yu.A.** Exact solutions of the two-dimensional Logunov–Tavkhelidze equation for «delta-circle» potentials in the relativistic configuration representation..... 111
- Paulenka A.V., Grishechkin Yu.A., Kapshai V.N.** Exact solutions of the two-dimensional Logunov–Tavkhelidze equation with a superposition of «delta-circle» potentials in coordinate representation 120

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Sereda M.S., Poryazov V.A., Krainov A.Yu.** Calculation of the unsteady combustion rate of metallized mixed solid propellants at harmonic pressure change 133
- Astanina M.S., Shashkin G.A.** Numerical study of thermogravitational convection in a closed region with a porous layer using different boundary conditions in the interface zone..... 143

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 539.216

DOI: 10.17223/00213411/68/10/1

Моделирование сверхрешеточного барьера для nBn -структур на основе $n\text{-HgCdTe}$ *Д.Е. Каширский¹, Д.И. Горн¹, А.В. Войцеховский¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проведена разработка физико-математической модели, позволяющей проводить вычисления энергетического спектра носителей заряда в сверхрешеточной структуре на основе $n\text{-HgCdTe}$ для целей оптимизации параметров сверхрешеточного барьера в фоточувствительных $nB(SL)n$ -структурах для MWIR- и LWIR-диапазонов. В основе модели лежит kp -метод (8-зонная kp -модель Кейна). Проведена оптимизация сверхрешеточного барьера для $nB(SL)n$ -структуры на основе $n\text{-HgCdTe}$. Показано, что сверхрешетка из 15 периодов слоев HgTe (1.75 нм) / $\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.7}\text{Te}$ (2 нм) должна обеспечивать беспрепятственное прохождение фотогенерированных (неосновных) носителей заряда через барьерный слой при эффективном блокировании тока основных носителей заряда в структуре для детектирования излучения LWIR-диапазона.

Ключевые слова: барьерная структура, HgCdTe , nBn , сверхрешетка, молекулярно-лучевая эпитаксия, униполярная структура.

Введение

Развитие униполярных барьерных структур на основе соединений HgCdTe в настоящее время рассматривается как перспективное направление для создания инфракрасных (ИК) фотоприемных устройств для среднего (MWIR, 3–5 мкм) и дальнего (LWIR, 8–14 мкм) инфракрасного диапазона с низкими темновыми токами, работающих при более высоких температурах охлаждения, чем классические фотодиоды на основе HgCdTe [1].

Важной задачей при разработке униполярных фоточувствительных барьерных nBn -структур на основе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) $n\text{-HgCdTe}$ для целей фотоприема является формирование эффективного барьера для основных носителей заряда в зоне проводимости для снижения темновых токов и одновременное устранение энергетического барьера в валентной зоне для повышения квантовой эффективности и чувствительности [2]. С учетом потенциала технологии МЛЭ [3] наиболее перспективной конфигурацией считается структура с барьером в виде сверхрешетки (СР) – $nB(SL)n$ -структуры [4–7]. Имеющиеся теоретические работы по данной теме обосновывают возможность создания барьера на основе сверхрешетки, эффективно блокирующего ток электронов и не препятствующего протеканию дырочного тока. Точный подбор параметров сверхрешетки (составы и толщины слоев) позволяет свести к минимуму величину разрывов энергетических зон на гетерограницах поглощающий слой/барьер/контактный слой [4].

Обзор последних достижений в направлении исследования подобных структур был проведен в [8]. К настоящему моменту в мировой научной литературе имеется крайне мало работ, посвященных изготовлению nBn -структур на основе HgCdTe с барьером в виде сверхрешетки и их экспериментальному исследованию. При этом подавляющее большинство работ по тематике nBn -структур на основе HgCdTe в целом являются теоретическими и описывают моделирование различных конфигураций фоточувствительных гетероструктур с целью снижения темновых токов и повышения чувствительности.

Практической реализации фоточувствительных структур на основе соединений A^2B^6 и, в частности HgCdTe , кроме фундаментальных (ненулевой разрыв валентной зоны в гетеропереходах) препятствуют также и технологические проблемы. С учетом опыта проведения экспериментальных исследований барьерных nBn -структур на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ мы знаем, что наблюдаемые в эксперименте вольт-амперные характеристики (ВАХ) часто отличаются от теоретических. Это связано, например, с доминированием токов поверхностной утечки, делающим невозможным

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-62-10021, <https://rscf.ru/project/23-62-10021/>.

Моделирование временных форм терагерцевых импульсов, генерируемых фотопроводящими полупроводниковыми антеннами*

Е.Р. Бурмистров¹, Л.П. Авакянц¹

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

На основе уравнений Максвелла в параксиальном приближении получены аналитические выражения, описывающие пространственно-временную динамику однопериодных терагерцевых (ТГц) импульсов в оптической среде с дисперсией показателя преломления. Показано, что при распространении в дальней зоне дифракции форма ТГц-импульсов трансформируется из однопериодных в полупериодные колебания, что сопровождается сдвигом спектра в область высоких частот. Сравнение с экспериментальными спектрами показало, что предложенные формулы успешно описывают однопериодическое излучение ТГц-импульсов, генерируемых фотопроводящими антеннами под воздействием излучения Ti:Sa-лазера.

Ключевые слова: фотопроводящие антенны, гауссов луч, импульсное терагерцевое излучение, параксиальная дифракция.

Введение

Генерация импульсного терагерцевого (ТГц) излучения представляет собой область активных исследований [1, 2]. В силу пикосекундной длительности ТГц-импульсы находят широкое практическое применение, в частности, в медицинской диагностике, спектроскопических исследованиях и при решении задач, связанных с обработкой и передачей информации [3, 4].

Важную роль в приложениях импульсной ТГц-спектроскопии играют фотопроводящие антенны (ФПА), которые, как правило, состоят из металлизированного слоя на полупроводниковой подложке. При облучении ФПА фемтосекундными лазерными импульсами в фотопроводящем материале в результате фотоионизации рождаются неравновесные носители заряда. ТГц-излучение возникает в результате преобразования фемтосекундных импульсов, подаваемых на ФПА, в излучение ТГц-диапазона.

Традиционно используемым материалом для ФПА, работающих с Ti:сапфировым лазером с длиной волны 800 нм, является GaAs. В работах [5–7] исследуются ФПА на основе низкотемпературного (LT – low temperature) GaAs. Установлено, что подвижность двумерных носителей в таких ФПА является низкой ($200 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), что обусловлено высокой концентрацией дефектов в материале. Низкая подвижность носителей заряда негативно сказывается на физических процессах, лежащих в основе работы ФПА, а также на характеристиках самого ТГц-излучения.

Распространение широкополосных терагерцевых импульсов в оптической однородной прозрачной среде представляет собой область глубоких исследований. Воздух, как среда, имеет свои физические свойства, такие как плотность и температурный градиент, которые влияют на форму световой волны. Следовательно, ТГц-импульсы могут испытывать незначительное ослабление и затухание, особенно на высоких частотах за счет взаимодействия электромагнитных волн с молекулами воздуха.

Исследования пространственно-временного профиля сверхкоротких широкополосных лазерных импульсов в диссипативных средах, обладающих сложной амплитудно-фазовой структурой, остаются недостаточно развитыми на сегодняшний день [7–10]. В последнее время существенное внимание стало уделяться описанию распространения оптических волн в среде, показатель преломления (или диэлектрическая проницаемость) которой изменяется со временем [11–13]. В большинстве случаев показатель преломления среды рассматривается как пространственно модулированный во времени равномерным образом в масштабе времени одного цикла падающего оптического поля. Поскольку трудно производить быстрые изменения показателя преломления в среде в рамках фемтосекундных временных масштабов, в экспериментах используются, как правило, низкие частоты световых полей [11].

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

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.533

DOI: 10.17223/00213411/68/10/3

О влиянии начальной скорости инжекции катодной плазмы на кинетику электронного и ионного потока в вакуумном разряде*А.В. Козырев¹, В.Ю. Кожевников¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

В рамках кинетического приближения проведен теоретический анализ бесстолкновительного механизма расширения катодной плазмы, инжектируемой в вакуумный промежуток в режиме импульсно-периодического режима эмиссии, при вариации среднего импульса потока. Показано, что придание ненулевого среднего импульса инжектируемому потоку на уровне тепловых импульсов существенно изменяет скорость расширения эмиссионной границы, которая кратно превышает тепловые скорости ансамблей частиц в катодной плазме. Полученные результаты позволяют глубже понять физические процессы, определяющие основные параметры разлета бесстолкновительной плазмы.

Ключевые слова: вакуумный разряд, бесстолкновительная плазма, кинетическое уравнение Власова, виртуальный катод.

Введение

Электрический разряд в вакууме лежит в основе работы таких устройств, как импульсные генераторы высокой мощности, ускорители электронов и ионов, микроволновые установки, импульсные рентгеновские генераторы и многие другие [1]. Последовательное изучение стадий протекания разряда, в том числе стадии вакуумного пробоя, искрового разряда и дугового процесса, является ключевым для обеспечения высокой эффективности и надежности данных систем.

Для понимания физического механизма развития электрического разряда в вакууме решающее значение имеет изучение начальной стадии инициирования пробоя промежутка. На этой стадии формируется поток катодной плазмы из области меньшего значения электрического потенциала (от катода) в область более высокого значения электрического потенциала (к аноду). Накопленная обширная экспериментальная база свидетельствует, что скорости расширения плазмы превышают 10^6 см/с, а ионы вносят до 12% общего заряда, переносимого через коллектор (анод) [2]. Кинетическая энергия ионов в вакуумных диодах составляет от десятков до сотен электрон-вольт.

До сих пор ведутся дискуссии о том, какие физические механизмы оказывают ключевое влияние на расширение катодной плазмы [2–5]. Была высказана гипотеза о том, что расширение катодной плазмы носит взрывной характер [5], и ускорение происходит при высоких плотностях (неидеальная плазма или газ с металлической плотностью) в области гидродинамических и электромагнитных разрывов при фазовых переходах. Энергетические потоки в эмиссионном центре обеспечивают условия для почти полной ионизации паров металла, что приводит к расширению катодной плазмы в вакуум со скоростями, значительно превышающими типичные экспериментальные значения [1–3].

Однако за последние годы был достигнут значительный прогресс в теоретическом понимании явления благодаря современным методам вычислительной физической кинетики. Использование кинетического описания многокомпонентной катодной плазмы позволило построить модели расширения катодной плазмы в различных геометрических и электрофизических конфигурациях диодов [6–9]. Было установлено, что основным механизмом нетеплового расширения катодной плазмы и аномального ускорения ионов является электрополевой эффект, обусловленный образованием локализованной области немонотонного распределения электрического потенциала, представляющего собой нестационарный виртуальный катод. Удалось рассчитать средние скорости расширения плазмы и выявить далеко не главную роль рассеивающих столкновений в этом про-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам № FWRM-2021-0007, FWRM-2021-0014.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.6/.8

DOI: 10.17223/00213411/68/10/4

Электромагнитные свойства композиционного материала на основе полиэтилена и МУНТ, инкапсулированных частицами кобальта*Е.Ю. Коровин¹, А.С. Качалов¹, В.В. Атамасов¹, А.А. Павлова¹, В.И. Суслев¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проведено исследование электромагнитных параметров композиционных материалов на основе многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), инкапсулированных частицами кобальта. Предложен метод расчета эффективной магнитной проницаемости частиц, расположенных в полости МУНТ. В основе метода лежит задача о нахождении потенциалов и результирующих магнитных полей для двухслойного цилиндра, находящегося в бесконечной среде. Проведен расчет эффективной магнитной проницаемости композиционного материала. Приведены результаты моделирования, показавшие эффект согласования волновых сопротивлений композита со свободным пространством и рост экранирующего эффекта при расположении на проводящей поверхности за счет наличия магнитных частиц.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, МУНТ, двухслойный цилиндр, математическое моделирование, композиционные материалы.

Введение

Гибридные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) продолжают вызывать значительный интерес благодаря широкому разнообразию специфических свойств, не присущих другим материалам: высокая прочность на разрыв [1], высокая гибкость [2], высокая тепло- и электропроводность, близкая к металлической [3, 4]. Активное изучение электромагнитных характеристик композитов на основе углеродных нанотрубок в различных диапазонах частот, проводимое в последнее время, показало эффективность взаимодействия с электромагнитным излучением, которое проявляется в виде отражения сигнала или поглощения электромагнитной энергии в объеме образца. Этот эффект широко используется для экранирования объектов различной природы с целью снижения последствий электромагнитного загрязнения [5], интенсивность которого быстро возрастает в связи с широким использованием высокочастотных устройств: мобильная связь, беспроводные компьютеры, системы слежения и др. При этом возникают проблемы, связанные с нарушением условий безопасности жизнедеятельности [6], электромагнитной совместимости в высокочастотной радиоэлектронной аппаратуре [7], качественной и надежной связи [8]. Спектральные характеристики коэффициентов отражения R , поглощения T , эффективности экранирования SE для целого ряда композиционных материалов подробно представлены в обзорах, например в [9–11], и в большом количестве оригинальных статей.

Использование чистых диэлектриков в качестве поглотителя на металле неэффективно, так как на проводящей поверхности при падении на нее электромагнитной волны формируются максимум переменного магнитного поля и минимум электрического. Металлические магнитные материалы имеют высокую проводимость и на высоких частотах применяются только для отражающих экранов. Поэтому для экранирования такой поверхности применяются магнитодиэлектрические композиты [12, 13]. Добавление в активную фазу магнитодиэлектрика проводящих материалов, в том числе УНТ, повышает эффективность экранирования.

Есть еще одна проблема, связанная с согласованием электромагнитных характеристик образца композита со свободным пространством, поскольку неизбежно возникает скачок волнового сопротивления $Z = [\mu^*(\omega) / \epsilon^*(\omega)]^{0.5}$, $\mu^*(\omega) = \mu(\omega) - i\mu(\omega)$, $\epsilon^*(\omega) = \epsilon(\omega) - i\epsilon(\omega)$, который определяет величину коэффициента отражения, из-за различий электромагнитных характеристик разных сред. Для согласования со свободным пространством используют многослойные покрытия с постепен-

* Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-29-00686.

Многоуровневая модель автоволнового распространения фронта пластической деформации*

В.А. Старенченко¹, Ю.В. Соловьева¹, И.Г. Вовнова¹, Я.Д. Липатникова¹

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

Методом многоуровневого 3D-моделирования, основанного на синтезе модели механики деформируемого твердого тела и модели дислокационной кинетики, проведено исследование неоднородностей пластического течения металлических материалов. На основе предложенного подхода получено описание экспериментально наблюдаемых неоднородностей пластической деформации различного вида. Представлены результаты численного эксперимента по деформации одноосным растяжением металлических образцов. Получены трехмерные картины распределения интенсивности пластической деформации, иллюстрирующие формирование стабильной и бегающей (распространяющейся) шейки при растяжении. Показано, что формирование автоволны пластической деформации в твердом теле в виде распространяющейся шейки обусловлено деформационно-сдвиговой неустойчивостью элемента деформируемой среды определенного вида.

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

Введение

Процессы пластической деформации кристаллов тесно связаны с явлениями локализации пластического течения, которые проявляются на различных масштабных уровнях [1]. Локализация на микроскопическом уровне связана, прежде всего, с образованием линий деформационного рельефа вследствие осуществления микросдвигов вдоль плоскостей скольжения, которые сопровождаются последовательностью субструктурных превращений [2]. Макроскопические формы локализации пластической деформации включают формирование шейки при растяжении, полос Чернова – Людерса [3–5], полос адиабатического сдвига при высокоскоростном воздействии [6–8], формирование в кристалле зон высокотемпературной суперлокализации пластической деформации [9, 10] и др. Эти процессы часто оказывают негативное влияние на качество обработки металлов, формуемость деталей и вызывают разрушение. Мезоскопический уровень является промежуточным, примером которого служит наблюдение полос сдвига в поликристаллах [11, 12]. По мере увеличения степени деформации локализация может развиваться от низших уровней до высших, вплоть до реализации макропроцессов, ведущих к нестабильной деформации и повреждению материала. Однако наличие механизмов аккомодации способно стабилизировать развитие процессов, делая деформацию более однородной.

Ранее нами было показано влияние различных факторов на варианты развития макрокартин пластического течения в различных условиях нагружения: с устойчивой и неустойчивой локализацией; появление множественной локализации [13]. Факторы могут быть как внутренние, так и внешние: от немоности пластических свойств элемента среды, концентраций вакансий, размера фрагментов, размера зерен и т.д. до размеров образца и наличия или отсутствия макроконцентраторов напряжений на поверхности образца. Геометрические параметры образца также оказывают влияние на особенности локализации деформации.

В представленной работе в рамках трехмерной модели синтеза кинетики накопления деформационных дефектов и механики деформируемого твердого тела [13] приводится описание неоднородностей пластического течения в условиях одноосного растяжения металлических материалов. Анализируются сценарии поведения малых элементов деформируемой среды, приводящие к различным картинам деформации в макроскопическом масштабе. Особое внимание уделяется обсуждению механизмов формирования распространяющейся шейки при растяжении, которое сопровождается движением фронтов пластической деформации. Показано, что распространение фронтов пластической деформации является одним из примеров триггерной автоволны переключения.

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

Влияние концентрации вводимого кислорода на термическую стабильность внутренне-окисленного сплава V–Cr–Zr*

И.В. Смирнов¹, И.А. Дитенберг¹

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

Проведено исследование термической стабильности внутренне-окисленного сплава V–Cr–Zr в зависимости от концентрации кислорода, введенного в процессе химико-термической обработки. Установлено, что увеличение концентрации кислорода от 0.65 до 1.34 ат.% способствует повышению температуры начала первичной рекристаллизации от $0.7 T_{пл}$ до $0.85 T_{пл}$. Показано, что по мере повышения значения коэффициента стехиометрического соотношения происходит не только смещение температуры активизации первичной и вторичной рекристаллизации в область более высоких температур, но и, в отличие от классических представлений, наблюдается тенденция к почти совместной реализации этих процессов. Таким образом, экспериментально обосновано применение химико-термической обработки для повышения термической стабильности сплава V–Cr–Zr на 300 град и более.

Ключевые слова: сплавы ванадия, химико-термическая обработка, термическая стабильность.

Введение

Как известно [1–16], дисперсное упрочнение является одним из эффективных способов повышения термической стабильности поликристаллических гетерофазных сплавов. Закрепляя границы зерен и элементы полигональной структуры, наноразмерные частицы вторых фаз обеспечивают подавление процессов рекристаллизации. Предназначенные для высокотемпературного применения сплавы ванадия после выплавки часто характеризуются наличием грубодисперсных выделений в виде метастабильных карбидов и оксикарбонитридов, что переводит их в разряд гетерофазных материалов [17]. Модификация гетерофазной структуры таких сплавов возможна методами термомеханической и химико-термической обработки (ХТО) [15, 16]. В первом случае диспергирование осуществляется путем дробления, растворения, перераспределения и выделения стабильных карбидов [15]. При реализации ХТО в готовый сплав дополнительно вводится кислород, который в условиях низкотемпературного диффузионного легирования обеспечивает формирование мелкодисперсных частиц оксидных фаз [16].

Проведенные в работе [18] оценки показали, что скорость коагуляции наноразмерных частиц ZrC в температурном интервале 700–1000 °C снижается, по сравнению с частицами TiC, примерно на порядок, в то время как частиц ZrO₂ – на 2–4 порядка. Это обеспечивает возможность повышения термической стабильности гетерофазной структуры и верхней границы интервала рабочих температур сплавов V–ZrC, по сравнению с V–TiC, на 100–200 град, а в композициях типа V–ZrO₂ эта граница может быть повышена на 200–300 град.

В настоящей работе исследовано влияние концентрации вводимого кислорода на термическую стабильность внутренне-окисленного сплава V–Cr–Zr.

Материалы и методика исследования

В работе использован сплав V–8.62Cr–0.66Zr–0.064O–0.036N–0.042C (ат.%) (далее V–Cr–Zr) производства АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (г. Москва). Химико-термическая обработка (ХТО) по методу внутреннего окисления проведена на образцах толщиной ≈ 1 мм после термомеханической обработки по режиму ТМО-II [15]. ХТО включает в себя следующие этапы [16]:

1. Формирование поверхностной окалины в процессе отжига на воздухе при 600–700 °C, продолжительность которого определяется необходимой концентрацией кислорода (C_O).
2. Вакуумный ступенчатый (от 620 до 1000 °C) отжиг в течение 9 ч.
3. Стабилизирующий вакуумный отжиг при 1100 °C в течение 1 ч.

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

Влияние термообработки на теплопроводность монокристаллов PbTe со сверхстехиометричным свинцом

Г.З. Багиева¹, Р.М. Исмаилов²

¹ Институт физики им. акад. Г.М. Абдуллаева Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

² Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

Выращены монокристаллы PbTe со сверхстехиометричным свинцом до 0.1 ат.% и исследовано влияние термообработки на их теплопроводность в интервале температур 90–300 К. Рассчитаны электронная и решеточная части теплопроводности и тепловое сопротивление, обусловленные структурными дефектами. Выяснено, что перенос тепла в исследованных кристаллах осуществляется в основном колебаниями решетки. Термическая обработка, заживляющая структурные дефекты, приводит к увеличению теплопроводности изученных образцов PbTe <Pb>.

Ключевые слова: монокристаллы, теплопроводность, технологические дефекты, сверхстехиометрия, вакансия.

Введение

Соединения типа $A^{IV}B^{VI}$ и твердые растворы на их основе принадлежат к числу полупроводниковых материалов, нашедших широкое применение в ИК-технике и термоэлектрических преобразователях [1–4].

В некоторых случаях возможности применения этих материалов ограничиваются высокой концентрацией электрически активных собственных дефектов (вакансии в подрешетке катиона и аниона), обусловленных отклонением состава от стехиометрии. Некоторые легирующие примеси, вводимые в PbTe, повышают его термоэлектрическую эффективность [5, 6]. Например, добавки Tl до 2 ат.% в PbTe увеличивают термоэлектрическую эффективность материала и этот сплав в основном применяют при низких температурах (до 400 К), добавление Na до 1 ат.% также увеличивает эффективность при температурах ~ 700 К, а добавки In повышают фоточувствительность тонких пленок в терагерцовой области спектра [7, 8]. В работах [9, 10] показаны возможности повышения термоэлектрической эффективности за счет увеличения коэффициента мощности и уменьшения теплопроводности путем наноструктурирования.

В связи с применением PbTe и его твердых растворов в термоэлектрических преобразователях исследованию их теплопроводности посвящен ряд работ [11–13].

В настоящей работе исследовано влияние избытков свинца и термообработки на теплопроводность χ и решеточное тепловое сопротивление W_p монокристаллов PbTe в интервале температур 90–300 К.

Методика эксперимента

Для синтеза соединения PbTe со сверхстехиометричными атомами свинца (0, 0.005, 0.05, 0.1 ат.% Pb) были использованы теллур марки Т-сЧ и свинец марки С-0000. Исходные компоненты дополнительно очищались от окисной пленки методом пропускания их расплава через узкие горлышки в откачанных до $\sim 10^{-3}$ Па кварцевых ампулах. Образцы PbTe <Pb> получали прямым сплавлением исходных компонентов в кварцевой ампуле с внутренним диаметром ~ 8 мм, откачанной до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па при ~ 1225 К в течение 6 ч. Внутренняя поверхность кварцевых ампул с конусообразным концом графитизировалась. После синтеза ампула охлаждалась до комнатной температуры.

Охлажденная ампула с синтезированным материалом в вертикальном положении помещалась в двухзонный электронагреватель и методом Бриджмена выращивались монокристаллы данного синтезированного состава.

В процессе выращивания кристалла расстояние между верхними и нижними зонами электронагревателя составляло ~ 15 мм и верхняя зона имела температуру на 50 град выше, а нижняя на 50 град ниже температуры плавления состава. Скорость спуска ампулы (роста кристалла) ~ 2 мм/ч. Монокристалличность выращенных слитков PbTe <Pb> была подтверждена методом

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.874.6

DOI: 10.17223/00213411/68/10/8

Об особенностях поля на ребре в многосекторных структурах с проводящими гранями*

В.В. Фисанов^{1,2}, А.С. Запасной¹¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия² Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Исследуется явление особенности поля на общем ребре многосекторных структур электромагнитных метаматериалов при наличии клина с идеально проводящими гранями. Закономерности формирования показателя особенности изучаются применительно к трех- и четырехсекторным структурам, диэлектрические или магнитные проницаемости которых имеют положительные, отрицательные или нулевые значения. Предложен критерий возникновения значения гиперсингулярности, не совместимого с условием Мейкснера на ребре.

Ключевые слова: электромагнитные метаматериалы, ребро, клин, показатель особенности поля.

Введение

В теории дифракции электромагнитных волн доказываем, что единственность решения уравнений Максвелла гарантируется выполнением всех граничных условий и условия на бесконечности, если присутствует неограниченная область пространства. Однако при наличии резких нерегулярностей у граничных поверхностей типа острых углов, ребер или вершин требуется выполнение дополнительного условия, известного как «условие на ребре» [1]. Впервые оно было сформулировано Дж. Мейкснером применительно к тонким проводящим экранам. Вблизи края идеально проводящей поверхности напряженность перпендикулярных к ребру компонент электромагнитного поля, как правило, велика и неограниченно нарастает с уменьшением расстояния до этой неоднородности. Порядок роста должен быть таким, чтобы плотность электромагнитной энергии в области пространства, окружающей край, была интегрируемой [2]. Иными словами, энергия поля должна быть конечной в любом конечном объеме, в котором не содержатся источники поля. Радиальное поведение поля в окрестности ребра есть $\sim r^t = r^{-1+\tau}$, где r – расстояние в цилиндрической системе координат с центром на ребре. Согласно Мейкснеру, степенной показатель должен быть $t > -1$, т.е. $\tau > 0$ (или $\operatorname{Re} \tau > 0$ для комплексных значений τ , имея в виду, что $|r^{\operatorname{Re} \tau + i \operatorname{Im} \tau}| = r^{\operatorname{Re} \tau}$). Значение $\operatorname{Re} \tau = 0$ не соответствует условию Мейкснера и иногда называется гиперсингулярностью, поэтому модельные структуры, где оно возникает, следует признать электродинамически некорректными. Для тонких идеально проводящих экранов типа полуплоскости было получено значение показателя особенности $\tau = 1/2$ [2], а для идеально проводящего клина, ограничивающего однородное пространство с угловым размером Ψ , – значение $\tau = \tau_0 = \pi/\Psi$ [3]. Дальнейшее усложнение реберных структур производится посредством добавления одной [4] или нескольких [5] границ раздела между угловыми секторами диэлектрических (или магнитных) сред с общим ребром, что приводит к трансцендентным дисперсионным уравнениям относительно показателя особенности τ . Они содержат тригонометрические функции и в общем случае произвольного кусочно-однородного заполнения клиновидной области не имеют аналитического решения.

Знание величины показателя τ является полезным для создания эффективных алгоритмов численного расчета электромагнитного поля в сложнопостроенных структурах с ребром, позволяет оценить опасность электрического пробоя, а также является критерием физической реализуемости электродинамических моделей с острым краем. Современная актуализация тематики реберной

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

Магнитокристаллическая анизотропия гексаферритов системы $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ *

В.А. Журавлев¹, Р.Ш. Сайидкулов¹, О.А. Доценко¹, Д.В. Вагнер¹

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

Представлены результаты исследования ферромагнитного резонанса на сферических образцах поликристаллических оксидных гексагональных ферримагнетиков Y-типа составов $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ с концентрацией $0.0 \leq x \leq 2.0$ в диапазоне частот 37–50 ГГц. Гексаферриты синтезированы стандартным керамическим методом. Из опытов по ферромагнитному резонансу (ФМР) определены поля магнитокристаллической анизотропии и величины магнито-механических отношений как целевой Y-фазы, так и примесных фаз. Полученные по данным ФМР оценки фазового состава синтезированных материалов сравниваются с результатами рентгенофазового анализа.

Ключевые слова: гексагональный ферримагнетик, ферромагнитный резонанс, магнитокристаллическая анизотропия, магнито-механическое отношение.

Введение

Оксидные ферримагнетики с гексагональной кристаллической структурой (гексаферриты) находят широкое применение в различных отраслях современной науки и техники. О неослабевающем интересе ученых и инженеров к этим материалам свидетельствует значительный рост числа публикаций, посвященных исследованиям физических свойств и различным аспектам применения гексаферритов, отмеченный в обзорных работах [1–4].

В отличие от ферритов со структурой шпинели или граната, гексаферриты обладают большими значениями полей магнитокристаллической анизотропии (МКА), а также сравнительно высокими величинами намагниченности насыщения (M_s) и температуры Кюри [5]. По типу МКА гексаферриты подразделяются на две группы.

К первой группе относятся магнито-жесткие материалы (феррооксиды) с положительной константой МКА, большими величинами полей МКА (H_a) и магнитным упорядочением типа ось легкого намагничивания (ОЛН), которая направлена вдоль гексагональной оси c кристалла. Они используются для изготовления постоянных магнитов, в качестве носителей магнитной записи, а также в различных устройствах микроволнового и миллиметрового диапазонов длин волн. К ним относятся простейшие гексаферриты M-типа со структурой магнетоплюмбита: $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ($0.0 \leq x \leq 1.0$). Методы получения, магнитные свойства и области применения этих материалов подробно рассмотрены в работах [1, 5] и в специализированных обзорах [6, 7].

Вторая группа – это магнито-мягкие материалы (феррооксиды) с отрицательной константой анизотропии и магнитным упорядочением типа плоскость легкого намагничивания (ПЛН). Шесть направлений легкого и промежуточного намагничивания данной группы материалов расположены в базисной плоскости кристалла, перпендикулярной гексагональной оси c . К этой группе материалов относятся гексаферриты более сложных структурных типов: Y, W, Z, X, U. Методики синтеза, кристаллографическая структура и магнитные свойства феррооксидов описаны также в работах [1, 5] и в специализированном обзоре [8]. Характерной особенностью феррооксидов, содержащих в своей структуре ионы Co^{2+} , является наличие последовательности спин-ориентационных фазовых переходов (СОФП) при уменьшении температуры от точки Кюри [5]. Вблизи температуры Кюри они имеют магнитное упорядочение типа ОЛН. При понижении температуры происходит переход к магнитному упорядочению типа ПЛН через промежуточную фазу типа конус легкого намагничивания (КЛН). Дальнейшее охлаждение приводит к СОФП от ПЛН к КЛН. В кобальтсодержащих гексаферритах W- и Z-типов температуры этих переходов подробно исследованы в работах [9, 10]. Как правило, поле анизотропии в базисной плоскости (H_ϕ) феррооксидов существенно меньше (приблизительно на два порядка), чем поле анизотропии относительно гексагональной оси ($H_\parallel$) [5]. Поэтому эти материалы имеют более высокие значения магнитной проницаемости в микроволновом диапазоне, чем материалы с ОЛН [5]. Их применяют при изготовлении под-

* Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.36, 535.015

DOI: 10.17223/00213411/68/10/10

Особенности параметризации неколмогоровских моделей спектра турбулентности*В.П. Лукин¹¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Выполнен анализ особенностей параметризации неколмогоровских моделей спектра турбулентности оптических сред при расчете параметров оптических систем, используемых в этих средах. Было показано, что при одной и той же форме спектров турбулентности различные неколмогоровские модели будут по-разному зависеть от внутреннего и внешнего масштабов турбулентности. Для кармановской модели спектра турбулентности с колмогоровским наклоном в инерционном интервале радиус когерентности в оптической волне оказывается независимым от величины внешнего масштаба турбулентности. В предположении, что интегральная энергия турбулентности не зависит от вида спектра турбулентности, получены соотношения для взаимного пересчета структурных параметров показателя преломления среды для различных типов турбулентности. Полученные в работе результаты позволяют пересчитывать параметры оптических волн при распространении в турбулентной среде с одним законом изменения спектра для сред с другим законом поведения спектра турбулентности.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, модели спектра турбулентности, неколмогоровская турбулентность.

Введение

Для того чтобы грамотно сопоставить результаты измерения уровня турбулентности, получаемые с помощью оптических измерителей, нужна корректная параметризация моделей спектров турбулентности. В этой связи в работе была поставлена цель получить аналитические выражения для расчетов флуктуаций параметров оптических волн при их распространении в турбулентной среде с неколмогоровским спектром турбулентности.

Впервые подходы к этому были предложены в работах [1–5]. Для модели энергетического спектра флуктуаций показателя преломления с произвольным степенным наклоном в области инерционного интервала, т.е. когда внутренний масштаб турбулентности стремится к нулю, а внешний масштаб стремится к бесконечности, можно записать следующее выражение:

$$\Phi_n(\kappa, \alpha) = \frac{\Gamma(\alpha - 1) \cos(\alpha\pi/2)}{4\pi^2} C_n^2(\alpha) \kappa^{-\alpha}, \quad (1)$$

где α – параметр модели, характеризующий наклон спектра в инерционном интервале волновых чисел κ ; $C_n^2(\alpha)$ – структурная постоянная показателя преломления среды, которая имеет размерность $\text{м}^{3-\alpha}$ и представляет собой среднюю разность флуктуаций показателя преломления на разном в 1 м.

Спектру $\Phi_n(\kappa, \alpha)$ по формуле (1) соответствует структурная функция показателя преломления $D_n(\vec{R})$, которая вычисляется [6–8] по формуле

$$D_n(\vec{R}) = 2 \iint d^3 \kappa \Phi_n(\vec{\kappa}) [1 - \cos(\vec{\kappa} \vec{R})] = 8\pi \int_0^\infty d\kappa \kappa^2 \Phi_n(\kappa) \left[1 - \frac{\sin \kappa R}{\kappa R} \right], \quad (2)$$

где κ – пространственное волновое число турбулентной неоднородности; $\vec{R}$ – двумерный вектор точки наблюдения.

Последнее выражение можно параметризовать, приведя к следующему общему виду:

* Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

Моделирование влияния пространственной неоднородности массива углеродных нанотрубок в полимере на распространение электромагнитного импульса*

Н.Н. Конобеева¹

¹ Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Россия

Проведено теоретическое исследование процесса прохождения электромагнитного импульса через неоднородный массив углеродных нанотрубок, помещенный в полимерный материал. Неоднородность обуславливается наличием примесного слоя, обладающего высокой концентрацией электронов. Проанализировано влияние толщины неоднородной области, концентрации полимера и начальной скорости импульса на его распространение. Определены параметры, позволяющие управлять пропускаемостью слоя для падающей электромагнитной волны.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, композит с углеродными нанотрубками, неоднородность.

Введение

В последние десятилетия лазерные системы, излучающие импульсы света, содержащие только несколько колебаний электрического поля (предельно короткие) [1], стали обычным явлением во многих сверхбыстрых оптических лабораториях. Они могут иметь различную форму (например, гауссову, супергауссову, Эйри, Бесселя) и встречаются в различных нелинейных средах [2–4]. Благодаря уникальным временным характеристикам и достижению экстремальных напряженностей поля эти импульсы с малым количеством циклов сыграли важную роль в открытии новых режимов взаимодействия света и вещества и находят много приложений, таких как оптическая связь [5], генерация гармоник высокого порядка [6], прецизионная обработка материалов [7] и др.

Предложены различные подходы к получению таких импульсов. Одним из них является оптическое параметрическое усиление [8]. Альтернативный метод – это спектральное уширение и посткомпрессия импульса – позволяет получить высокую энергоэффективность и большие коэффициенты сжатия [9, 10], до 120 раз [11]. В работе [12] предложен способ генерации предельно коротких импульсов на основе нелинейного смешивания мод в полом волокне без необходимости дополнительной посткомпрессии.

Также отметим необходимость выбора подходящего материала, в котором предельно короткие оптические импульсы могли бы устойчиво распространяться. Это важно при разработке оптических устройств (например, волноводов, переключателей). Одним из таких вариантов являются углеродные нанотрубки (УНТ) [13], которые хорошо зарекомендовали себя при формировании электромагнитных солитонов [14].

Ранее было выявлено, что учет дополнительных параметров, в том числе содержания примесей в УНТ [15] и наличия различного рода неоднородностей [16], оказывает большое влияние как на пространственные, так и на энергетические характеристики оптического импульса. В работах [17, 18] определены особенности взаимодействия бризерного решения уравнения синус-Гордона с неоднородной средой, в том числе во внешнем высокочастотном поле. Отметим, что в настоящей работе исследуется гауссов профиль как в поперечном, так и в продольном направлении.

При этом важным вопросом является учет влияния полимера, который используется для создания композитного материала с модифицированными свойствами за счет взаимовыгодного союза с углеродными нанотрубками [19]. В данной работе основное внимание уделяется получению определенной структуры УНТ с заданными параметрами при помощи полимера, а не изменению свойств композита [20]. Теоретическому исследованию особенностей взаимодействия электромагнитного импульса с композитом, содержащим неоднородный слой, а также оценке влияния полимерной составляющей и посвящена настоящая работа.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «FZUU-2023-0001»).

Однорезонаторный параметрический генератор света на базе монокристалла ZGP с прямой накачкой излучением Tm:YLF-лазера*

И.Д. Еранов^{1,3}, Н.Н. Юдин^{1,2,4}, О.Л. Антипов³, Е.С. Слюнько^{1,2},
М.М. Зиновьев^{1,2,4}, В.С. Кузнецов^{1,2}, Д.В. Власов¹, М.М. Кулеш¹,
С.Н. Подзываетов^{1,2}, А.Б. Лысенко^{1,2}, А.Ю. Кальсин^{1,2}

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

² ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты исследования параметрического генератора света на базе монокристалла ZGP, работающего при прямой накачке импульсно-периодическим излучением Tm:YLF-лазера ($\lambda = 1.908$ мкм). Описана конструкция однорезонаторной схемы и получены энергетические характеристики генерации в диапазоне 3.2–4.6 мкм. Максимальная средняя мощность генерации составила ~ 650 мВт при КПД $\sim 8.2\%$.

Ключевые слова: параметрический генератор, ZGP, средний ИК-диапазон, Tm:YLF-лазер, нелинейная оптика.

Введение

Импульсно-периодические источники мощного когерентного излучения среднего ИК-диапазона, с дискретным набором длин волн и/или плавной перестройкой по спектральному диапазону, имеют целый ряд применений во многих областях, таких как обработка материалов (стекло, керамика и полупроводников) с помощью технологий термораскола и скрайбирования [1]; зондирование атмосферы, дистанционное определение состава веществ и экологический мониторинг [2–4]; медицина, включая диагностику заболеваний с помощью газоанализа и резонансную абляцию биологических тканей [5, 6].

Наиболее мощные параметрические генераторы света (ПГС) в диапазоне длин волн 3–5 мкм со средней мощностью излучения более 100 Вт или энергией в импульсе более 200 мДж при длительности импульсов 15–30 нс и частоте их следования в диапазоне 100 Гц – 100 кГц созданы на основе монокристалла ZnGeP_2 [7–10]. Эти ПГС накачивались излучением импульсно-периодических лазеров на кристаллах, активированных ионами Ho^{3+} : Ho^{3+} :YAG или Ho^{3+} :YLF на длине волны 2091 или 2053 нм соответственно [8–10]. Лазеры на кристаллах Ho^{3+} :YAG или Ho^{3+} :YLF накачиваются, в свою очередь, излучением тулиевых волоконных лазеров или лазеров на кристаллах Tm:YLF [11, 12]. Такие каскадные лазерные системы довольно сложны и громоздки, чтобы быть оптимальным выбором для компактной конструкции излучателей среднего ИК-диапазона на основе ПГС. Более того, общая оптическая эффективность от диодов накачки до излучения среднего ИК-диапазона снижается из-за потерь при передаче энергии от ~ 1.9 мкм Tm-лазеров до ~ 2 мкм Ho-лазеров. К сожалению, поглощение в монокристалле ZGP в области длин волн короче 2 мкм, связанное с наличием дефектов и примесей [7], затрудняет использование лазерного излучения этих длин волн, в частности лазеров на кристаллах и керамике, активированных ионами Tm^{3+} , для накачки ПГС на кристаллах ZGP. В последние годы в связи с улучшением оптического качества кристаллов ZGP удалось осуществить накачку ПГС на этих кристаллах с помощью лазерного излучения на длине волны короче 2 мкм [13–15]. В частности, сообщалось о реализации ПГС на ZGP с накачкой излучением импульсно-периодического Tm:YLF-лазера на длине волны 1908 нм с диодной накачкой [16].

Цель настоящей работы – определение энергетических характеристик излучения ПГС на базе отечественного нелинейного кристалла ZnGeP_2 в спектральном диапазоне 3–5 мкм при накачке излучением Tm:YLF-лазера с длиной волны 1.908 мкм.

* Данное исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (бюджетные средства ИОА СО РАН).

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.145.83

DOI: 10.17223/00213411/68/10/13

**Динамика степени совпадения и критерия отрицательности
для трехкубитной модели Джейнса – Каммингса**А.Р. Багров¹, Е.К. Башкиров¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Представлено точное решение для оператора эволюции трехкубитной модели Джейнса – Каммингса. Предполагается, что кубиты приготовлены в начальный момент времени в истинно перепутанных состояниях W- или GHZ-типа, а поле – в вакуумном состоянии. На основе точного решения были рассчитаны волновые функции, элементы трехкубитной матрицы плотности и параметры перепутывания кубитов – парные отрицательности и степень совпадения. С помощью выбранных параметров перепутывания был проведен полный анализ динамики перепутывания кубитов.

Ключевые слова: кубиты, эффект мгновенной смерти перепутывания, резонатор, степень совпадения, вакуумное поле, отрицательность.

Введение

Многочастичные перепутанные состояния кубитов играют ключевую роль в таких квантовых технологиях, как квантовые вычисления и квантовые компьютеры, квантовые коммуникации и квантовые сети, и в других устройствах квантовой обработки информации [1]. Одним из важнейших элементов квантовых компьютеров являются вентили, с помощью которых проводятся любые операции над кубитами. Описание физических реализаций как двухкубитных, так и трехкубитных вентилях можно найти, например, в работе [2]. Повышенный интерес к трехкубитным системам обусловлен тем фактом, что они могут использоваться для создания универсальных трехкубитных вентилях Тоффли и Фредкина, благодаря которым на квантовом компьютере можно реализовать более сложные квантовые алгоритмы, а также улучшить коды квантовых коррекций ошибок ([3] и ссылки в ней). Одним из главных минусов в реализации универсального трехкубитного вентиля была низкая точность выполнения операций по сравнению с двухкубитными вентилями. Однако недавно физикам удалось реализовать трехкубитный вентиль на основе двухкубитных взаимодействий с относительно высокой точностью 98.26(2)% [4].

В случае трехкубитных систем выделяют несколько классов состояний: сепарабельные, бисепарабельные и истинно перепутанные состояния W- и GHZ-типа [5]. На сегодняшний момент наиболее интересные для квантовой информатики трехкубитные перепутанные состояния W- и GHZ-типа были экспериментально реализованы в большом количестве экспериментов для различных типов кубитов ([6] и ссылки в ней). Для управления состояниями кубитов их внедряют в сверхпроводящие резонаторы. Для теоретического исследования взаимодействия кубитов различной физической природы с выделенными модами сверхпроводящих резонаторов обычно используют модель Джейнса – Каммингса и ее обобщения [7]. В последнее время в рамках моделей типа Джейнса – Каммингса исследовано большое количество квантовых систем, используемых для реализации алгоритмов квантовых вычислений, квантовой телепортации и протоколов квантовой криптографии ([7] и ссылки в ней).

В нашей работе [8] исследовалось перепутывание пар кубитов в рамках обобщенной трехкубитной модели Джейнса – Каммингса, в которой один из кубитов находится в изолированном состоянии, а два других кубита заперты в микроволновой резонатор и резонансно взаимодействуют с тепловым полем данного резонатора посредством однофотонных переходов. В качестве начальных состояний кубитов выбирались истинно перепутанные состояния W-типа, а в качестве критерия перепутывания пар кубитов – парная отрицательность. Вместе с тем хорошо известно, что для трехкубитных систем отрицательность пар кубитов в трехкубитной модели в строгом смысле не

Точные решения двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе для потенциалов «дельта-окружность», заданных в релятивистском конфигурационном представлении*

А.В. Павленко¹, В.Н. Капшай¹, Ю.А. Гришечкин¹

¹ Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь

Получены точные решения двумерных парциальных интегральных уравнений Логанова – Тавхелидзе для системы двух частиц одинаковой массы в случае потенциала «дельта-окружность» и суперпозиции двух таких потенциалов, заданных в релятивистском конфигурационном представлении. Показано, что в случае одиночного потенциала «дельта-окружность» в зависимости от его параметров система может иметь либо одно связанное состояние, либо не иметь их вовсе. Для суперпозиции двух потенциалов «дельта-окружность» возможны случаи одного или двух связанных состояний, или их отсутствия. Анализ волновых функций выявил различие их свойств в разных представлениях: в релятивистском конфигурационном представлении число нулей парциальной волновой функции равно номеру состояния системы частиц, тогда как в импульсном представлении количество нулей превышает их число в конфигурационном представлении. Найден нерелятивистский предел полученных решений, который согласуется с решениями двумерного уравнения Шрёдингера в случае аналогичных потенциалов в импульсном и координатном представлениях.

Ключевые слова: двухчастичная система, квазипотенциальный подход, двумерное уравнение Логанова – Тавхелидзе, двумерное релятивистское конфигурационное представление, двумерное импульсное представление, парциальная волновая функция, двумерная функция Грина, связанные состояния.

Введение

В современной квантовой теории двумерных систем основным инструментом для описания состояний рассеяния [1–4], связанных состояний [5–8] и влияния слабосвязанных состояний на сечения рассеяния [9–11] остается уравнение Шрёдингера. Однако его принципиальное ограничение заключается в неприменимости к релятивистским системам, что существенно сужает область возможных исследований. При этом до сих пор не рассматривалась возможность использования двухчастичных двумерных квазипотенциальных интегральных уравнений в релятивистском конфигурационном представлении (РКП).

Потенциалы с δ -функциями представляют особый интерес, так как позволяют точно решать одномерные и трехмерные квазипотенциальные уравнения [12–15]. Особый интерес представляет суперпозиция δ -потенциалов, которая успешно применяется для моделирования нуклон-нуклонных взаимодействий [16–18]. В данной работе мы рассматриваем решение двумерных интегральных квазипотенциальных уравнений для потенциалов, содержащих δ -функции.

Парциальные квазипотенциальные уравнения

Интегральные уравнения квазипотенциального подхода для парциальных волновых функций $\psi_\mu(iw_q, \rho)$ в двумерном РКП, описывающие связанные состояния системы двух скалярных частиц одинаковой массы m в системе их центра масс, имеют следующий вид ($\hbar = c = 1$) [19]:

$$\psi_\mu(iw_q, \rho) = 2\pi \int_0^\infty G_\mu(iw_q; \rho, \rho') V(\rho') \psi_\mu(iw_q, \rho') d\rho', \quad (1)$$

где $\mu = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – азимутальное (орбитальное) квантовое число; ρ – модуль радиус-вектора в РКП; w_q – параметр, принадлежащий интервалу $(0; \pi/2]$ и связанный с энергией двухчастичной системы формулой $2E_q = 2m \operatorname{ch}(iw_q) = 2m \cosh w_q$; $V(\rho')$ – локальный в двумерном РКП квазипотенциал; $G_\mu(iw_q; \rho, \rho')$ – парциальные функции Грина, которые в случае уравнения Логанова – Тавхелидзе имеют вид [19]

* Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант по проекту Ф25М–004).

**Точные решения двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе
с суперпозицией потенциалов «дельта-окружность»,
заданных в координатном представлении***А.В. Павленко¹, Ю.А. Гришечкин¹, В.Н. Капшай¹¹ Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь

В импульсном представлении применительно к описанию связанных состояний системы двух скалярных частиц одинаковой массы получены точные и приближенные решения двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе для четырех вариантов релятивистского обобщения сепарабельных в импульсном представлении потенциалов, которые в координатном представлении имеют вид суперпозиции потенциалов «дельта-окружность». Получены точные и приближенные условия квантования энергии для одного потенциала «дельта-окружность» и суперпозиции двух потенциалов такого вида. Установлено, что при фиксированном значении азимутального квантового числа вышеуказанные системы частиц имеют одно, два или вовсе не имеют связанных состояний в зависимости от параметров системы. Получены и исследованы в импульсном представлении парциальные волновые функции с последующим переходом в координатное представление. Показано, что парциальные волновые функции в импульсном представлении имеют бесконечное количество нулей, в то время как в координатном представлении количество нулей равно номеру состояния.

Ключевые слова: двумерное уравнение Логанова – Тавхелидзе, двухчастичная система, парциальная волновая функция, двумерное импульсное представление, двумерное координатное представление, связанное состояние, сепарабельный потенциал, дельта-окружность, условия квантования энергии.

Введение

Потенциалы, содержащие дельта-функции, представляют особый интерес как в нерелятивистской [1–5], так и в релятивистской [6–11] квантовой механике, так как для данного типа взаимодействий возможно получение точных аналитических решений уравнений, сформулированных для описания состояний частиц. Суперпозиция дельта-потенциалов успешно применялась для исследования нуклон-нуклонных взаимодействий [3, 4], а также для построения приближенных решений [5]. Кроме того, хорошо изучены решения уравнения Дирака для потенциалов подобного типа [6–8]. В настоящей работе осуществляется поиск точных и приближенных решений двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе для четырех вариантов релятивистских обобщений сепарабельного потенциала в импульсном представлении (ИП), который в координатном представлении имеет вид суперпозиции «дельта-окружностей».

Парциальные интегральные уравнения и релятивистские обобщения потенциала

Рассмотрим двумерное уравнение Логанова – Тавхелидзе в ИП, посредством которого описываются связанные состояния системы двух скалярных частиц одинаковой массы m . В системе центра масс оно имеет вид ($\hbar = c = 1$)

$$(E^2 - m^2 - \mathbf{p}^2) \psi(\mathbf{p}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int V(E; \mathbf{p}, \mathbf{k}) \psi(\mathbf{k}) \frac{m}{E_k} d^2k, \quad E_k = \sqrt{k^2 + m^2}, \quad (1)$$

где $2E$ – энергия двухчастичной системы ($0 \leq 2E < 2m$); $\mathbf{p}$ и $\mathbf{k}$ – двумерные относительные импульсы ($p = |\mathbf{p}|$ и $k = |\mathbf{k}|$); $\psi(\mathbf{p})$ – волновая функция; $V(E; \mathbf{p}, \mathbf{k})$ – квазипотенциал.

Получим парциальные интегральные уравнения, представляя функцию $\psi(\mathbf{p})$ и потенциал $V(E; \mathbf{p}, \mathbf{k})$ в полярных координатах в виде парциальных разложений:

$$\psi(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \psi_{\mu}(p) \exp(i\mu\varphi_p), \quad (2)$$

$$V(E; \mathbf{p}, \mathbf{k}) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} V_{\mu}(E; p, k) \exp[i\mu(\varphi_p - \varphi_k)], \quad (3)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант по проекту Ф25М–004).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 536.46+662.61

DOI: 10.17223/00213411/68/10/16

Расчет нестационарной скорости горения металлизированного смесового твердого топлива при гармоническом изменении давления*М.С. Середа¹, В.А. Порязов¹, А.Ю. Крайнов¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Проведены расчеты нестационарной скорости горения металлизированного смесового твердого топлива при гармоническом изменении давления над поверхностью горения. Получены зависимости амплитуды колебаний скорости горения от частоты колебаний давления. Показано, что амплитуда скорости горения зависит от частоты монотонно. С увеличением частоты амплитуда сначала растет, а затем уменьшается. Показано, что добавка мелкодисперсного порошка алюминия в состав топлива снижает зависимость мгновенной скорости горения при гармоническом изменении давления. При повышении порядка химической реакции в газе скорость горения увеличивается. Показано, что при гармоническом изменении давления средняя скорость горения больше стационарной скорости при среднем давлении.

Ключевые слова: смесовое топливо, алюминий, скорость горения, гармонические колебания давления.

Введение

Одной из актуальных задач теории горения является определение нестационарной скорости горения твердых ракетных топлив. В частности, при изменении давления в камере сгорания. Феноменологическая теория нестационарного горения [1, 2] позволяет предсказать зависимость скорости горения от изменения давления при относительно небольших скоростях изменения давления [3, 4].

В некоторых случаях в камерах сгорания ракетных двигателей на твердом топливе возникают колебания давления, обусловленные совокупностью причин, таких как размеры камеры сгорания, свойства твердого топлива, давление в камере сгорания [5, 6]. Для экспериментального изучения этого явления используется Т-камера [7, 8]. Частота изменения давления в камере сгорания может изменяться от 100 до 1000 1/с и выше. Развитие колебаний давления объясняют акустической проводимостью топлива [7–10]. Однако в этих экспериментах определяются лишь изменение давления в камере сгорания во времени и средняя скорость горения топлива в этих условиях. В [1] представлено аналитическое решение задачи о средней скорости горения твердого топлива в условиях колебаний давления в камере сгорания. Показано, что при гармоническом изменении давления средняя скорость горения меньше стационарной скорости при среднем давлении.

Цель данной работы – проведение анализа нестационарного горения металлизированного смесового твердого топлива (МСТТ) при гармоническом изменении давления над поверхностью горения. Задача моделирования нестационарного горения твердых ракетных топлив при гармоническом изменении давления решена с использованием сопряженной модели горения твердого топлива, когда учитываются процессы переноса тепла и в твердой, и в газовой фазе [11, 12].

Математическая модель

Система уравнений математической модели в системе координат, связанной с поверхностью твердого вещества, запишется как в [11]. Физическая постановка задачи о горении МСТТ подробно описана в работе [12].

Для конденсированной фазы, при $-\infty < x < x_s$:

$$c_1 \rho_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + u \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + Q_1 k_1 \rho_1 (1 - \eta) \exp \left(-\frac{E_1}{RT_1} \right), \quad (1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

Численное исследование термогравитационной конвекции в замкнутой области с пористым слоем при различных граничных условиях в межфазной зоне*

М.С. Астанина¹, Г.А. Шашкин¹

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

Исследован численный анализ естественной конвекции в двумерной замкнутой области, где жидкость с переменной вязкостью взаимодействует с пористым слоем и твердым тепловыделяющим элементом, расположенным на нижней стенке. Управляющие уравнения были сформулированы в безразмерной форме с использованием функции тока и завихренности и решены методом конечных разностей на равномерной вычислительной сетке. Изучено распределение гидродинамических и тепловых характеристик, включая изолинии функции тока и температуры, а также ключевые интегральные параметры, такие как среднее число Нуссельта на поверхности источника тепла и средняя температура источника. Особое внимание уделено оценке влияния граничных условий на границе раздела между жидкостью и пористой средой.

Ключевые слова: свободная конвекция, пористая вставка, тепловыделяющий элемент, модель локального теплового неравновесия, метод конечных разностей, граничные условия.

Введение

Знание процессов естественной конвекции внутри пористых сред играет важную роль в таких сферах, как добыча нефти, охлаждение электроники, изучение загрязнения подземных вод и т.д. Работа посвящена актуальной проблеме моделирования естественной конвекции в тепловой системе, включающей в себя жидкость, пористую матрицу и твердый тепловыделяющий элемент. Подобные системы широко востребованы в прикладных задачах, таких как оптимизация тепловых процессов в энергетике (например, повышение эффективности методов теплового воздействия на нефтяные пласты), разработка систем охлаждения микроэлектроники (где пористые структуры используются для интенсивного отвода тепла от компактных элементов) и прогнозирование экологических рисков (распространение загрязнений в грунтовых водах через пористые геологические слои). Особую научную новизну представляет использование модели локального теплового неравновесия (LTNE) для анализа переходных процессов в условиях резких градиентов температуры на границе фаз. В отличие от классического подхода локального теплового равновесия (LTE), учет разделения тепловых полей в твердой и жидкой фазах позволяет более адекватно описывать системы с высококонтрастными свойствами компонентов, что критически важно для инженерных расчетов.

Термогравитационная конвекция в пористых средах является важным аспектом в изучении тепломассообмена, особенно в замкнутых полостях с различными граничными условиями. Численные исследования в этой области позволяют глубже понять влияние параметров пористости, геометрии и тепловых условий на структуру течения и эффективность теплопереноса. В работе [1] исследуется естественная конвекция в наклонной квадратной полости, заполненной пористым материалом, при синусоидальном распределении температуры на боковых стенках. Численное моделирование показало, что наклон полости и форма температурного распределения существенно влияют на структуру течения и теплоперенос. Авторы работы [2] провели численное исследование естественной конвекции в квадратной полости, заполненной наножидкостью, с использованием метода сплайн-функций. Результаты показали, что добавление наночастиц и изменение параметров пористости значительно влияют на теплоперенос и структуру течения. В [3] рассмотрена естественная конвекция в квадратной пористой полости с синусоидальным нагревом на боковых стенках. Используя модель Дарси – Бринкмана – Форхгеймера, было показано, что изменение амплитуды и фазы температурного распределения существенно влияет на интегральные характеристики теплообмена. Авторы работы [4] провели трехмерное численное моделирование естественной конвекции в анизотропной пористой среде с внутренней генерацией тепла. Исследование показало, что анизотропия пористого материала и наличие внутреннего тепловыделения существенно

* Исследование выполнено в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00029).

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 10

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 16.10.2025. Выпуск в свет 27.10.2025. Заказ № 6509.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 17.67. Уч.-изд. л. 19.79. Тираж 42 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