

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

10·2023

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Октябрь, 2023

№ 10 (791)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02
Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>
E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Бочарникова Е.Н., Конов И.А., Курцевич А.Е., Аксенова Ю.В. Новые оптические материалы для датчика криогенных температур на основе комплексов бис(дипиррометена).....	5
Власов Д.В., Юдин Н.Н., Антипов О.Л., Зиновьев М.М., Грибенюков А.И., Подзывалов С.Н., Слюнько Е.С., Юдин Н.А., Кузнецов В.С., Лысенко А.Б., Кальсин А.Ю., Воеводин В.И., Черемис М.А. Перестраиваемый в диапазоне длин волн 3.3–4.2 мкм параметрический генератор света на базе монокристалла ZnGeP_2 со спектральной шириной генерируемого излучения 1 см^{-1}	17
Михайлов М.М., Лапин А.Н., Юрьев С.А., Артишев С.А., Горончко В.А., Труфанова Н.С., Михайлова О.А., Федосов Д.С. Оптические свойства и радиационная стойкость печатного покрытия на основе серебра	23
Шефер О.В. Особенности ослабления оптического излучения различными компонентами ледяного облака	31

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Дзядах С.М., Горн Д.И. Моделирование и оптимизация параметров слоев униполярных фоточувствительных $n\text{Вп}$ -структур на основе МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ для детектирования в MWIR диапазоне.....	44
Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Кодиров Н.У., Исоммадинова У.М. Межзонное однофотонное поглощение света и его линейно-циркулярный дихроизм в кристаллах тетраэдрической симметрии	54
Попова А.С., Липатов Е.И., Войченко Д.С., Генин Д.Е. Краевая фотолуминесценция алмазов при возбуждении на 222 нм в температурном диапазоне 85–300 К	64

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Красненко Н.П., Власов Е.В., Раков А.С. Применение радиофизических методов для обеспечения орнитологической безопасности объектов и территорий	72
--	----

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Филиппов А.И., Ахметова О.В., Зеленова М.А., Ковальский А.А., Кабиров И.Ф., Левина Т.М., <u>Валитов Р.Р.</u> , Юсупов И.Т. Экспериментальное исследование фильтрационных волн	79
---	----

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Абдулвагабова С.К., Эфендиева И.К. Поведение амплитуды рассеяния при малых и больших переданных импульсах в пределе асимптотически больших энергий	89
Зарипов Р.Г. Взаимозависимые состояния и соотношения неопределенностей для квантовых систем	95
Скобелев В.В., Красин В.П. О средних числах нейтрино в системе ν_e, ν_μ, ν_τ	101

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Нефедов Д.В., Шабунин Н.О. Импульсная тренировка тонкопленочных катодов на основе графитовых пленок	108
Осипов В.В., Платонов В.В., Шитов В.А. Особенности приготовления керамических образцов из селенида цинка с использованием нанопорошков, синтезированных в лазерном факеле.....	116

CONTENTS

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Bocharnikova E.N., Konov I.A., Kurtsevich A.E., Aksenova I.V. New optical materials for cryogenic temperature sensor based on bis(dipyrromethene) complexes.....	5
Vlasov D.V., Yudin N.N., Antipov O.L., Zinoviev M.M., Gribenyukov A.I., Podzyvalov S.N., Slyunko E.S., Yudin N.A., Kuznetsov V.S., Lysenko A.B., Kalsin A.Yu., Voevodin V.I., Cheremis M.A. Optical parametric oscillator based on ZnGeP ₂ single crystal tunable in the wavelength range of 3.5–4.2 μm with spectral width of generated radiation of 1 cm ⁻¹	17
Mikhailov M.M., Lapin A.N., Yuryev S.A., Artishchev S.A., Goronchko V.A., Trufanova N.S., Mikhailova O.A., Fedosov D.S. Optical properties and radiation resistance of silver-based printing coating.....	23
Shefer O.V. Peculiarities of extinction of optical radiation by various components of ice cloud.....	31

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Voitsekhovskii A.V., Grigoriev D.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I. Simulation and optimization of layer parameters of unipolaral <i>nBn</i> structures based on MBE <i>n</i> -HgCdTe for MWIR detection.....	44
Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Kodirov N.U., Isommaddinova U.M. Linear-circular dichroism of interband one-photon absorption of light in tetrahedral symmetry crystals.....	54
Popova A.S., Lipatov E.I., Voytenko D.S., Genin D.E. Edge photoluminescence of diamonds upon excitation at 222 nm in the temperature range 85–300 K.....	64

MATHEMATICAL PROCESSING OF PHYSICS EXPERIMENTAL DATA

Krasnenko N.P., Vlasov E.V., Rakov A.S. Radio physical methods of ensuring ornithological safety of objects and territories.....	72
---	----

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Filippov A.I., Akhmetova O.V., Zelenova M.A., Kovalsky A.A., Kabirov I.F., Levina T.M., Valitov R.R., Yusupov I.T. Experimental research of filtration waves.....	79
--	----

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Abdulvahabova S.G., Afandiyeva I.G. Behaviour of the scattering amplitude in the transmission of small and large pulses in the limit of asymptotically large energies.....	89
Zaripov R.G. Interdependent states and uncertainty relations for quantum systems.....	95
Skobelev V.V., Krasin V.P. About neutrino averages in the system ν_e, ν_μ, ν_τ	101

CONDENSED-STATE PHYSICS

Nefedov D.V., Shabunin N.O. Pulse training of thin-film cathodes based on graphite films.....	108
Osipov V.V., Platonov V.V., Shitov V.A. Features of preparing ceramic samples from zinc selenide using nanopowders synthesized in a laser torch.....	116

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 538.958

DOI: 10.17223/00213411/66/10/1

Новые оптические материалы для датчика криогенных температур на основе комплексов бис(дипиррометена)*Е.Н. Бочарникова¹, И.А. Конов¹, А.Е. Курцевич¹, Ю.В. Аксенова¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Изучены спектральные и люминесцентные свойства ряда биядерных бор(III)дипиррометеновых комплексов bis(BODIPY) в наборе органических растворителей. Эффективность квантового выхода люминесценции определена в зависимости от длины волны возбуждения и полярности среды. Изучена зависимость люминесцентных свойств структурно-родственных комплексов 2,2'-, 2,3'- и 3,3'-bis(BODIPY) от температуры в диапазоне от 298 до 77 К. Отмечено увеличение интенсивности флуоресценции в области низких температур. Наличие линейной температурной зависимости указывает на возможность создания новых материалов для криогенных датчиков на основе комплексов bis(BODIPY). Экспериментальные данные обобщены и проанализированы с помощью квантово-химических расчетов, которые выявили особенности электронных структур этих соединений. Определены также локальные минимумы на исследуемой области поверхности потенциальной энергии и смоделированы вертикальные переходы в этих позициях, что соответствует полосам поглощения в экспериментальных спектрах.

Ключевые слова: дипиррометеновые комплексы, bis(BODIPY), спектроскопия, оптические датчики температур, криогенная область, DFT-расчеты.

Введение

Оптические датчики – это устройства, которые используются для мониторинга окружающей среды. Они известны как одни из самых универсальных измерительных приборов, способных определять широкий спектр параметров, таких как температура, давление, уровень радиации, сила, электрическое поле, pH, деформация, концентрация химических веществ, уровень жидкости, магнитное поле, акустическое поле и т.д. Оптический датчик работает путем измерения показаний в световом пучке из-за изменения интенсивности света, которые определяют оптические свойства: фазу, длину волны, поляризацию и спектральное распределение. В последние несколько лет были предприняты значительные усилия по проектированию и разработке различных оптических датчиков, в том числе на основе сложных органических молекул и их металлокомплексов [1–3]. Наиболее распространенными методами, используемыми в оптических датчиках, являются оптическое поглощение и люминесценция, но также были разработаны системы, основанные на оптических параметрах, таких как коэффициент преломления и отражательная способность [4].

На сегодняшний день существуют различные методы измерения температуры в макроскопическом масштабе. К ним относятся аналоговые термометры (основанные на расширении жидкости), термпары, тепловизоры и инфракрасные датчики. За последние 10 лет возрос интерес к разработке флуоресцентных датчиков температуры, поскольку эти датчики обладают высокой точностью измерения, высокой чувствительностью, а также быстрым откликом и широким температурным диапазоном [5–7]. Необходимо также учитывать, что измерение низких (криогенных) температур имеет уникальные особенности. Существующие (описанные выше) традиционные методы измерения температур в диапазоне от 298 до 77 К показывают низкую эффективность, что затрудняет их практическое использование. Поэтому важно изучить оптическое измерение температуры, которое может реализовать бесконтактное измерение показаний, широкий диапазон и быстрый отклик.

Соединения с интенсивной полосой люминесценции, зависящей от температуры, могут быть использованы в качестве оптических материалов для таких температурных датчиков [8–11]. Одним из характерных соединений являются дипиррометеновые комплексы, в частности их биядер-

* Исследование выполнено при поддержке программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030, проект № НУ 2.0.7.22 МЛ).

**Перестраиваемый в диапазоне длин волн 3.3–4.2 мкм
параметрический генератор света на базе монокристалла ZnGeP_2
со спектральной шириной генерируемого излучения 1 см^{-1} ***

Д.В. Власов¹, Н.Н. Юдин^{1,2,3}, О.Л. Антипов⁴, М.М. Зиновьев^{1,2,3},
А.И. Грибенюков⁵, С.Н. Подзывалов^{1,3}, Е.С. Слюнько^{1,3}, Н.А. Юдин^{1,2}, В.С. Кузнецов^{3,6},
А.Б. Лысенко^{1,3}, А.Ю. Кальсин^{1,3}, В.И. Воеводин^{1,3}, М.А. Черемис^{1,3}

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

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

³ *ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия*

⁴ *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

⁵ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

⁶ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Создан параметрический генератор света на базе монокристалла ZnGeP_2 с накачкой излучением Ho:YAG-лазера, генерирующий излучение по II типу синхронизма с плавной перестройкой в спектральном диапазоне генерации с шириной генерируемого излучения 1 см^{-1} за счет использования внутриврезонаторной селекции излучения с помощью фильтра Лيو. Импульсная энергия генерируемого излучения составила 0.08 мДж при частоте следования импульсов 10 кГц и длительности импульсов 26 нс. Диапазон перестройки составил от 3.3 до 4.2 мкм. Расходимость генерируемого излучения не превышала 1.5 мрад.

Ключевые слова: оптический пробой, ZnGeP_2 , параметрические генераторы света, фильтр Лео.

Введение

Когерентные источники излучения, способные генерировать перестраиваемое узкополосное излучение в диапазоне длин волн 3–5 мкм, могут применяться для обработки стекол и керамики, полупроводниковых материалов с помощью технологий термораскола и скрайбирования [1]. Источники лазерного излучения с дискретным набором длин волн и/или их плавной перестройкой по спектральному диапазону актуальны также для зондирования атмосферы и дистанционного определения состава веществ, мониторинга экологической обстановки [2–4], определения размеров мелкодисперсных объектов [5, 6]. Импульсные и импульсно-периодические лазеры среднего ИК-диапазона с энергией в импульсе до 1 мДж и его длительностью 10–100 нс имеют большой потенциал в области медицины, включая резонансную абляцию костных тканей [7–9] и малоинвазивную хирургию глаза [10–12].

Одними из самых эффективных твердотельных источников когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне являются параметрические генераторы света (ПГС). Наиболее мощные ПГС в диапазоне длин волн 3–5 мкм созданы в настоящее время на основе нелинейно-оптических кристаллов ZnGeP_2 (ZGP) [13–16]. ПГС на основе ZGP могут генерировать излучение со средней мощностью до 160 Вт или энергией в импульсе до 200 мДж при длительности импульсов 20–40 нс и частоте их следования от единиц герц до ста килогерц [14–16]. Эффективная генерация излучения в диапазоне длин волн 3–5 мкм в ПГС на базе ZGP осуществляется при накачке лазерным излучением с длиной волны 2.1 мкм по I типу синхронизма. При этом выходной спектр сигнальной и холостой волн линейного двухрезонансного ПГС представляет собой, как правило, несколько линий шириной около 20–30 нм в рамках групп с шириной $\sim 200\text{ нм}$.

Для перечисленных выше практических применений ПГС должен обладать следующими характеристиками генерируемого излучения: средняя мощность $\sim 10\text{ Вт}$, импульсная энергия $\sim 0.1\text{--}1\text{ мДж}$ при частотах следования импульсов $\sim 10\text{--}100\text{ кГц}$ и длительности импульсов генерируемого излучения порядка нескольких десятков наносекунд. Однако данные источники должны

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-20035, <https://rscf.ru/ru/project/22-12-20035>, дата обращения 25 марта 2022 г.) и Министерства образования и науки Нижегородской области (соглашение 316-06-16-24/23 от 20.04.23).

Оптические свойства и радиационная стойкость печатного покрытия на основе серебра*

М.М. Михайлов¹, А.Н. Лапин¹, С.А. Юрьев¹, С.А. Артищев¹,
В.А. Горончко¹, Н.С. Труфанова¹, О.А. Михайлова¹, Д.С. Федосов¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Рассмотрен способ получения отражающего покрытия на принтере Voltera V-One из низкотемпературной проводящей пасты Voltera Conductor 2 на основе наночастиц серебра. Выполнены исследования морфологии поверхности, фазового состава, спектров диффузного отражения в диапазоне 200–2500 нм до и после облучения электронами с энергией 30 кэВ и ИК-спектров полученного покрытия. Установлено, что предложенный способ нанесения и использования пасты Voltera Conductor 2 позволяет получать терморегулирующие проводящие покрытия с отражательной способностью на уровне применяемых аналогов и очень высокой радиационной стойкостью. Полученные результаты могут быть использованы в различных областях науки и техники.

Ключевые слова: терморегулирующие покрытия, паста, принтер, печать, спектры диффузного отражения, серебро, радиационная стойкость.

Введение

Технологии 3D-печати широко используются во многих областях науки и техники. В печатной электронике на основе токопроводящих, полупроводниковых и диэлектрических паст изготавливают датчики [1], транзисторы [2, 3], солнечные элементы [4], радиочастотные идентификационные метки [5, 6], органические светоизлучающие диоды [7–10], схемы RC-фильтров [11]. В качестве проводниковых паст в основном используют пасты на основе серебра [12, 13].

Другим направлением применения печатных технологий может быть изготовление отражающих или поглощающих покрытий из уже существующих марок паст или приготовленных на основе пигментов с необходимой отражательной способностью (например, ZnO, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, BaSO₄). Пасты на основе серебра, как показано выше, уже широко применяются, также покрытия на основе серебра используются в пассивном терморегулировании космических аппаратов. Такие покрытия типа ОСО-С или К-208Ср в виде стекла с напыленным слоем серебра обладают высокой радиационной стойкостью и исходной отражательной способностью в солнечном диапазоне спектра [14].

Несмотря на широкое применение принтерной печати с использованием паст на основе металлов, оптические свойства получаемых структур в литературе практически не рассматриваются. Поэтому представляет интерес исследование оптических свойств полученных таким методом покрытий и их стойкости к действию излучений.

Цель настоящей работы – изучение оптических свойств поверхности, структуры и радиационной стойкости покрытия, полученного с помощью печати на принтере Voltera V-One пастой Voltera Conductor 2 на основе наночастиц серебра.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования была выбрана низкотемпературная проводящая паста Voltera Conductor 2 производства «Voltera Inc.», Канада. Наполнителем данной пасты являются наночастицы серебра, растворителем – моноэтиловый эфир диэтиленгликоля. Образцы печатали принтером Voltera V-One на керамических подложках из поликора (диаметр ложки составляет 23 мм). После печати осуществляли вжигание пасты в муфельной печи при температуре 210 °С в течение 30 мин. Толщина образцов составила 20 мкм. Были дополнительно изготовлены образцы со сниженной до 150 °С температурой вжигания.

Микрофотографии поверхности образцов получали на растровом электронном микроскопе Сохем EM-30 Plus. Шероховатость поверхности определяли оптическим профилометром Chotest SuperView W1. Рентгенофазовые исследования выполняли на рентгеновском дифрактометре

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № FEWM-2022-0005.

Особенности ослабления оптического излучения различными компонентами ледяного облака^{*}

О.В. Шефер¹

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

Представлены результаты расчета фактора ослабления оптического излучения ансамблем мелких и крупных кристаллов различной формы и ориентации. Продемонстрировано влияние на ослабление оптических свойств ледяных кристаллов, размерного параметра, фактора формы, а также вариаций среднего размера частиц с учетом их разброса по размерам. Предложена схема оценивания коэффициента ослабления оптического излучения кристаллическим облаком при совместном и раздельном влиянии различных составляющих среды.

Ключевые слова: ледяные облака, кристаллы, ориентация, ослабление, оптическое излучение, оценивание.

Введение

Знание процесса ослабления лучистой энергии кристаллическими облаками играет важное значение в понимании и прогнозировании погодообразующих процессов и радиационного баланса атмосферы. Однако роль в этом ледяных облаков является одной из самых мало изученных [1, 2]. Исследование влияния физико-химических свойств частиц на прохождение излучения имеет первостепенное значение для понимания воздействия ледяных облаков на трансформацию радиационных потоков.

Характер ослабления лучистой энергии сильно зависит от среды прохождения излучения. В научной литературе широко представлены результаты исследования ослабления для отдельных частиц и монодисперсной среды [3–5]. В большей степени такое рассмотрение касается хаотически ориентированных кристаллов и/или единичных длин волн.

В природных условиях наблюдается большое разнообразие форм и размеров кристаллов [6, 7]. По характеру ослабления наибольший интерес представляют частицы, которые обеспечивают спектральную зависимость экстинкции. К ним относятся мелкие рассеиватели (соизмеримые с длиной волны падающего излучения) и крупные (их размер много больше длины волны) преимущественно ориентированные кристаллы, имеющие плоскопараллельные грани. Для крупных (i) хаотически ориентированных кристаллов и (ii) кристаллов, для которых нарушение параллельности граней более 10° , ослабление определяется эффективной площадью тени частиц и их концентрацией в единице объема и не зависит от природы вещества, толщины частиц, а также длины волны падающего излучения (рассеянное поле в направлении вперед определяется только дифракционным полем, а фактор ослабления для таких рассеивателей равен 2) [8, 9]. Такая оценка была нами получена при расчете характеристик ослабления в рамках метода физической оптики [10]. При этом трансформированное поле в ближней зоне определялось по результату когерентного сложения дифракционного и рефракционного (прошедшего через рассеиватель) полей с последующим пересчетом в дальнюю зону (для этого использовался интеграл Фраунгофера). Эффект когерентного суммирования наиболее ярко проявляет себя для случаев соизмеримости дифракционного и рефракционного полей для кристаллов с плоскопараллельными гранями (или с незначительным распараллеливанием граней, менее 10°). Для крупных гексагональных столбиков фактор ослабления может принимать значение из промежутка от 1 до 3 [9]. Рассматривая систему таких кристаллов с учетом их возможного вращения относительно их главной оси (вдоль длины столбика), а также в плоскости преимущественной ориентации (например, горизонтальная плоскость), отметим, что граница изменения фактора ослабления сужается. Для системы крупных преимущественно ориентированных пластинок фактор ослабления может принимать значение из максимально возможного промежутка от 0 до 4 [9]. Среди всех атмосферных кристаллов пространственное положение крупных пластинок являются наиболее устойчивым.

^{*} Работа выполнена при участии в Программе повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 539.216

DOI: 10.17223/00213411/66/10/5

**Моделирование и оптимизация параметров слоев
униполярных фоточувствительных $n\text{Вп}$ -структур на основе
МЛЭ $n\text{-HgCdTe}$ для детектирования в MWIR диапазоне***А.В. Войцеховский¹, Д.В. Григорьев¹, С.М. Дзядах¹, Д.И. Горн¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Определены оптимальные параметры фоточувствительной униполярной барьерной структуры, которая обладает фоточувствительностью в диапазоне 1–3 мкм, посредством расчета зависимостей максимальной обнаружительной способности D_{max} от состава барьерной области и уровня легирования контактной области. Для оптимизации была использована физико-математическая модель, ранее верифицированная экспериментально через сравнение результатов расчетов с результатами экспериментального исследования вольт-амперных характеристик структур, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Институте физики полупроводников СО РАН в г. Новосибирске.

Ключевые слова: барьерная структура, вольт-амперная характеристика, HgCdTe , молекулярно-лучевая эпитаксия, униполярная структура, фотоприемное устройство.

Введение

Актуальность создания фотодетекторов, обладающих чувствительностью в средней (3–5 мкм, MWIR) и дальней (8–14 мкм, LWIR) областях инфракрасного (ИК) диапазона и пониженными значениями темновых токов, определяется потребностью современной оптоэлектроники в высокочувствительных детекторах инфракрасного диапазона, действующих при повышенных температурах. При разработке таких детекторов предпочтительно использовать полупроводниковый твердый раствор HgCdTe , что обусловлено уникальными фундаментальными свойствами материала [1, 2].

Реализация режима ограничения шумами фонового излучения в современных детекторах на основе HgCdTe требует снижения температур детекторов до 77 К для уменьшения темновых (шумовых) токов. Распространенные сейчас гибридные детекторы на основе HgCdTe , выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), содержат p - n -переход, p -область которого формируется путем ионной имплантации акцепторной примеси и ее последующим отжигом. Необходимость использования этих технологических операций ограничивает качество изготовленных структур [3, 4]. Эти проблемы могут быть решены при выращивании методом МЛЭ детекторных структур с новыми архитектурами на основе слоев только с электронным типом проводимости (униполярных структур). Разработка униполярных структур на основе МЛЭ HgCdTe требует решения ряда фундаментальных и технологических задач, но открывает возможности повышения рабочей температуры детекторов.

Исследования барьерных структур на основе HgCdTe стали проводиться в ряде ведущих научных групп с 2011 г. Но большая часть публикаций носит обзорный и теоретический характер. Разработка конструкции униполярных барьерных фоточувствительных структур на основе HgCdTe заключается в оптимизации параметров слоев гетероструктур – контактного, барьерного и поглощающего – по трем параметрам или характеристикам: толщина, профиль состава и профиль легирования. Данная оптимизация производится за счет итерационного моделирования структуры с различными параметрами и оценки взаимного влияния параметров на результирующие значения плотности темнового тока, чувствительности или обнаружительной способности. Большая часть опубликованных к настоящему времени научных работ в этом направлении описывает именно такие исследования [5–13].

В настоящей работе проводилось определение оптимальных параметров фоточувствительной униполярной барьерной структуры, которая обладает фоточувствительностью в диапазоне

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

Межзонное однофотонное поглощение света и его линейно-циркулярный дихроизм в кристаллах тетраэдрической симметрии

В.Р. Расулов¹, Р.Я. Расулов¹, Н.У. Кодиров¹, У.М. Исоммадинова²

¹ Ферганский государственный университет, г. Фергана, Республика Узбекистан

² Кокандский государственный педагогический институт, г. Коканд, Республика Узбекистан

Развита теория межзонного однофотонного одноквантового поглощения сильной световой волны в алмазоподобных полупроводниках со сложной зоной в многозонном приближении Кейна. Получено аналитическое выражение для вероятности однофотонного межзонного перехода, содержащее зависимость от интенсивности, вектора поляризации и частоты поглощаемого света, а также от зонных параметров полупроводника, где учтен вклад в коэффициенты одноквантового поглощения света эффекта Раби оптических переходов. Показано, что форма края поглощения и линейно-циркулярного дихроизма зависит от степени поляризации света и от параметра Раби.

Ключевые слова: одноквантовое поглощение света, эффект Раби, линейно-циркулярный дихроизм, полупроводник со сложной зоной, матричные элементы и вероятности оптических переходов.

Введение

Создание оптических квантовых генераторов послужило мощным стимулом для обнаружения и всестороннего исследования широкого круга явлений нелинейной оптики [1–6]. К числу основных нелинейных по интенсивности оптических эффектов, возникающих в сильных световых полях, относится многофотонное поглощение, сопровождающееся переходами электронов из валентной зоны в зону проводимости. При описании этих переходов широко использовалась многозонная модель алмазоподобного полупроводника, содержащая зоны проводимости, валентные зоны и зоны спин-орбитального расщепления [7–9]. Вместе с тем большое число полупроводников, важных как в промышленном отношении, так и с точки зрения фундаментальных исследований, относится к соединениям типа $A_{III}B_V$ и $A_{II}B_{VI}$. Общим в электронной структуре этих соединений является вырожденность валентной зоны, содержащей подзоны легких и тяжелых дырок.

В частности, в работах [7–17] исследовано нелинейное поглощение по интенсивности света в полупроводниковых кристаллах со сложной зонной структурой, обусловленное вертикальными межзонными и внутризонными оптическими переходами. В этих работах считается, что нелинейность по интенсивности коэффициента однофотонного поглощения света возникает за счет эффекта Раби [10], и эта нелинейность как во внутризонном [9, 15, 16], так и в межзонном [17] поглощении света обусловлена фотоиндуцированной добавкой в функции распределения электронов и дырок, определяемой временем релаксации по энергии и импульсу, а также дельта-функцией Дирака, т.е. законом сохранения энергии.

В [12, 13] исследован линейно-циркулярный дихроизм (ЛЦД) в германии дырочной проводимости в случае, когда в поглощение вносят сопоставимые вклады n -фотонные процессы с $n = (1 \div 5)$. В [15, 16] исследован вклад эффекта Раби – эффекта когерентного насыщения в трех- и четырехфотонное поглощение поляризованного света, обусловленное внутризонными оптическими переходами.

Однако одноквантовое межзонное поглощение и его ЛЦД в кристаллах тетраэдрической симметрии с учетом эффекта Раби и температурной зависимости ширины запрещенной зоны остались открытыми, чему посвящена данная работа.

В настоящей работе развивается теория как одноквантового поглощения света, так и его ЛЦД с учетом эффекта Раби [8, 10], обусловленного прямыми оптическими переходами между подзонами валентной зоны и зоны проводимости прямозонного полупроводника. Получено аналитическое выражение для вероятности однофотонного межзонного перехода, содержащее зависимость от интенсивности, вектора поляризации и частоты поглощаемого света, а также от зонных пара-

Краевая фотолюминесценция алмазов при возбуждении на 222 нм в температурном диапазоне 85–300 К*

А.С. Попова¹, Е.И. Липатов^{1,2}, Д.С. Войтенко¹, Д.Е. Генин^{1,2}

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

² *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследованы спектры краевой фотолюминесценции беспримесного алмаза при возбуждении импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 222$ нм. Проанализированы зависимости интенсивности люминесценции свободных экситонов и электронно-дырочной жидкости в температурном диапазоне от 85 до 300 К и при плотностях возбуждения от 2.6 до 15.7 МВт/см². Проведен анализ декомпозиции спектров фотолюминесценции на фоновые компоненты. Выявлены температурные границы влияния электронно-дырочной жидкости на интенсивность экситонной люминесценции – от 152 К при плотности возбуждения 6.9 МВт/см² до 197 К при плотности возбуждения 15.7 МВт/см², что позволяет фиксировать формирование электронно-дырочной жидкости в алмазном образце без декомпозиции спектров фотолюминесценции на фоновые компоненты излучательной рекомбинации свободных экситонов и электронно-дырочной жидкости.

Ключевые слова: свободные экситоны, электронно-дырочная жидкость, фотолюминесценция, рекомбинация.

Введение

В связи с непрерывным увеличением рабочей частоты радиоэлектронного оборудования идет постоянный поиск полупроводниковых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, высокой подвижностью носителей заряда и высокой теплопроводностью. Переход на такие полупроводниковые материалы потенциально позволит создавать новые типы устройств с повышенными рабочими характеристиками. Одним из таких материалов является алмаз. Данный материал характеризуется высоким удельным сопротивлением, энергией связи свободных экситонов (СЭ) и напряжением электрического пробоя, большой шириной запрещенной зоны, а также высокой bipolarной подвижностью носителей зарядов. Исследование фундаментальных свойств алмаза является актуальной задачей в связи с развитием технологий синтеза и легирования алмаза, появлением коммерчески доступных образцов сверхчистого алмаза большого размера (до 50 мм) [1].

Одним из методов, позволяющих изучать фундаментальные свойства электронных возбуждений в алмазе, таких как электронно-дырочная плазма (ЭДП), экситоны Ванье – Мотта и Френкеля, биэкситоны, экситонные комплексы (ЭК) и электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ), является исследование краевой люминесценции образца. При возбуждении фотолюминесценции (ФЛ) фотонами с энергией, равной ширине запрещенной зоны, появляется возможность исследовать электронные возбуждения, не подверженные влиянию термализации горячих носителей и сопутствующего фоновому ветру, в отличие от катодо- и рентгенолюминесценции. Для беспримесного алмаза край фундаментального поглощения находится на 225 нм (5.49 эВ), поэтому для возбуждения в нем ФЛ необходимо лазерное излучение с длиной волны $\lambda \leq 225$ нм. Для этих целей наиболее подходящим является KrCl-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 222$ нм [2], что больше ширины запрещенной зоны алмаза на величину энергии поперечного акустического фонона.

Алмаз характеризуется энергией связи СЭ около 80 мэВ, что позволяет проводить исследования краевой люминесценции при комнатной температуре. При понижении температуры путем охлаждения жидким азотом в образцах высокого качества возможно наблюдать формирование экситонных комплексов и, при высокой плотности возбуждения, конденсацию СЭ в капли ЭДЖ. При приложении внешнего электрического поля формирование ЭДЖ в алмазном кристалле приводит к усилению фототока [3]. Этот эффект может найти применение в углеродной электронике и в высоковольтных оптоэлектронных коммутаторах больших мощностей, характеризующихся меньшей временной нестабильностью срабатывания (малым джиттером) по сравнению с электрическими разрядниками [4].

В данной работе исследованы спектры фотолюминесценции беспримесного алмаза при возбуждении импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 222$ нм, длительностью импуль-

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.06 + 57.084.2

DOI: 10.17223/00213411/66/10/8

Применение радиофизических методов для обеспечения орнитологической безопасности объектов и территорий*

Н.П. Красненко^{1,2}, Е.В. Власов¹, А.С. Раков¹¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Обсуждаются проблемы обеспечения орнитологической безопасности объектов и территорий. Приводится краткий обзор методов защиты от птиц и факторов, влияющих на эффективность отпугивания, особо выделяя акустическое отпугивание. На примере аэропорта г. Томска рассматривается использование биоакустических отпугивателей птиц направленного действия с системой технического зрения. Формулируются задачи создания эффективных орнитологических средств отпугивания с применением элементов искусственного интеллекта для обнаружения птиц, распознавания вида, формирования необходимого воздействующего излучения и др.

Ключевые слова: орнитологическая безопасность, биоакустический отпугиватель, система видеообнаружения птиц, искусственный интеллект.

Введение

Под орнитологической безопасностью понимаем как защиту каких-либо объектов и территорий от птиц, так и защиту самих птиц. К сожалению бывают ситуации, когда птицы наносят ущерб хозяйственной деятельности человека, каким-либо техническим объектам и сооружениям, приводят к гибели людей и гибнут сами.

Остановимся на проблемах обеспечения орнитологической безопасности, которые актуальны и требуют практического решения. Основная из них связана с авиационной безопасностью. Существуют и применяются разнообразные методы и средства для решения указанных проблем, однако коренных решений нет и в течение десятилетий они постоянно напоминают о себе.

Проблема орнитологического обеспечения безопасности полетов занимает в авиации одну из ведущих позиций. Согласно статистическим данным [1–3], столкновения самолетов с птицами на территории России и в мире происходят регулярно, на протяжении всего года, и являются основным повреждающим фактором самолетов биологического происхождения. Анализ материалов расследований и производственных происшествий [4] показывает, что опасность, создаваемая птицами, вносит существенный вклад в общую статистику происшествий. Статистика столкновений самолетов с птицами по России за последние годы приведена на рис. 1. Ежегодно прослеживается тенденция к увеличению случаев столкновений, что обусловлено ростом интенсивности авиаперевозок, снижением шумности двигателей самолетов, привыканием птиц к окружающей обстановке. Основное количество столкновений с птицами происходит на высотах до 300 метров, преимущественно на этапах снижения или набора высоты воздушным судном. Очевидно, что это происходит на территории аэродрома и вблизи от него. Практика в области орнитологического обеспечения безопасности полетов показывает, что при всем богатстве орнитофауны в столкновениях с воздушными судами участвует определенный спектр видов, более-менее специфичный для каждого конкретного аэропорта. Сосредоточив усилия на работе с этими видами, можно существенно снизить опасность, создаваемую птицами для воздушных судов. В каждом большом аэропорту существует орнитологическая служба, разрабатываются и реализуются мероприятия по снижению вероятности столкновений воздушных судов с птицами.

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00750, <https://rscf.ru/project/22-29-00750/>, на ИМКЭС СО РАН.

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 53.043

DOI: 10.17223/00213411/66/10/9

Экспериментальное исследование фильтрационных волн*

А.И. Филиппов^{1,2}, О.В. Ахметова¹, М.А. Зеленова¹, А.А. Ковальский¹,
И.Ф. Кабиров³, Т.М. Левина⁴, Р.Р. Валитов¹, И.Т. Юсупов¹

¹ Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, г. Стерлитамак, Россия

² ООО «РН-БаиНИПИнефть», г. Уфа, Россия

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

⁴ Институт нефтепереработки и нефтехимии Уфимского государственного нефтяного технического университета (филиал в г. Салавате), г. Салават, Россия

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования волновых фильтрационных полей. Показано, что скорость фильтрационной волны определяется вытесняющей способностью пористой среды, а не сжимаемостью, как это считалось ранее. Сопоставление предсказаний теории и результатов эксперимента показывает их хорошее согласие. Установлено, что упругие процессы в проницаемых средах преобладающе представлены фильтрационными волнами, а классическая теория упругих процессов в пористых средах ограничена в применении средами с несвязанной пористостью.

Ключевые слова: фильтрационные волны, фазовая скорость, частота, лабораторный эксперимент, эффект низкочастотного торможения.

Введение

Исследование волновых процессов в горных породах имеет важное научное и практическое значение. Акустические волны используются при добыче углеводородов в широком частотном диапазоне от инфра- до ультразвуковых колебаний [1–3]. Повышение нефтеотдачи с помощью упругих волн связывается с изменением смачиваемости [4], вязкости [5, 6], уменьшением толщины поверхностного слоя в результате теплового эффекта ультразвукового воздействия [7, 8], повышением пористости и проницаемости [9], растворением парафинов и асфальтеносмолистых веществ, эмульгированием и деэмульгированием нефти и воды [10, 11] и т.д.

Между тем многие особенности волновых процессов в коллекторах нефти и газа изучены недостаточно. Слабо изученными являются так называемые фильтрационные волны, существование которых обусловлено наличием проницаемости, определяемой связанной пористостью. Исследование этих волн приобретает особое значение, поскольку коллекторы нефти и газа являются основным источником углеводородов.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию фильтрационных волн, представляющих особый случай распространения упругих колебаний в пористой среде. Исследование фильтрационно-волновых процессов в пористых средах, как и упругих волн других типов, имеет важное практическое значение для совершенствования методов повышения нефтеотдачи, акустического каротажа скважин, сейсморазведки месторождений нефти и газа, а также для гидрогеологии.

Теория

Классическая теория волновых процессов в пористой среде базируется на решении уравнения параболического типа, которым является уравнение пьезопроводности [1]. Последовательная теория фильтрационных волн в пористой среде, естественно, требует построения соответствующих волновых уравнений. Исторически попытки построения таких уравнений предпринимались на основе гипотезы о времени релаксации [12]. Введение времени релаксации при этом выполнено эмпирически, поскольку оно осуществлено искусственным добавлением слагаемых в классические уравнения и не имеет должного физического обоснования.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта 22-22-00132.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 539.171.5

DOI: 10.17223/00213411/66/10/10

**Поведение амплитуды рассеяния
при малых и больших переданных импульсах
в пределе асимптотически больших энергий**С.К. Абдулвагабова¹, И.К. Эфендиева²¹ Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Рассмотрена амплитуда рассеяния при малых и больших переданных импульсах при высоких энергиях на основе квазипотенциального подхода. Квазипотенциал взят как суперпозиция потенциалов Юкавы. В качестве основного уравнения для амплитуды рассеяния служит условие упругой унитарности, аналитически продолженное в область выше первого неупругого порога. В орировской области с возрастанием энергии увеличение наклона в дифракционном пике показывает, что частицам становится легче рассеиваться с малыми поперечными импульсами. При больших передаваемых импульсах для амплитуды рассеяния имеет место орировское поведение с осцилляциями.

Ключевые слова: амплитуда рассеяния, унитарность, квазипотенциал, потенциал Юкавы.

Введение

В методе трехмерных уравнений особое место занимает квазипотенциальный подход, развитый Логуновым и Тавхелидзе [1]. Ядро трехмерного динамического уравнения – квазипотенциал – представляет собой релятивистское обобщение квантово-механического потенциала, но, в отличие от последнего, является комплексным и нелокальным. Квазипотенциал зависит от энергии системы, что отражает чисто релятивистские эффекты рождения частиц и запаздывания взаимодействия. Явная аналогия описания релятивистских систем на базе трехмерного динамического уравнения с нерелятивистской картиной взаимодействия позволяет использовать чисто эмпирические соображения классической физики при построении квазипотенциала взаимодействия [2]. Квазипотенциал в квантовой теории поля можно рассчитать по теории возмущений. Однако в задачах рассеяния квазипотенциал приходится задавать феноменологически. Суть квазипотенциального подхода близка к оптической модели ядра. При этом рассеяние рассматривается как движения нуклона в поле, описываемом комплексным потенциалом.

В настоящей работе на основе квазипотенциального подхода изучается поведение амплитуды рассеяния при малых и больших переданных импульсах при высоких энергиях.

1. Подход, основанный на условии унитарности амплитуды

Понятие единой аналитической функции привело к тому, что если нельзя найти амплитуду рассеяния заданного процесса, то можно отыскать связь этой амплитуды с амплитудами других процессов. Если массы взаимодействующих частиц не равны нулю, то при любых энергиях физически допустимым отрезком аналитичности является $(-1 \leq z \leq 1)$, где $z = \cos \theta$, θ – угол рассеяния в с.ц.м. Эффективная область взаимодействия зависит от того, насколько отрезок аналитичности вырождается внутри отрезка $(-1 \leq z \leq 1)$, и это приводит к неравенству

$$\sigma_{tot} \leq 4\pi R^2, \quad (1)$$

где R – радиус, соответствующий полуклассической картине рассеяния частицы на шарике конечного радиуса R . Этого оказалось достаточным, чтобы при высоких энергиях установить верхние границы сечения взаимодействия и следить за поведением амплитуды рассеяния в зависимости от переданных импульсов.

Взаимозависимые состояния и соотношения неопределенностей для квантовых систем

Р.Г. Зарипов¹

¹ *Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия*

Получены новые и уточняются известные соотношения неопределенностей, учитывающие взаимозависимость состояний системы для двух и трех физических величин. Рассматривается матричный аналог соотношения неопределенностей Робертсона – Шредингера для описания нескольких физических состояний квантовой системы. Дается обобщение квантового неравенства Рао – Крамера для взаимосвязанных состояний системы в термодинамическом равновесии.

Ключевые слова: соотношение неопределенностей, корреляция, матрица.

Введение

Неустранимые ограничения, связанные с флуктуациями физических величин и определяющие точность измерения в статистических теориях, имеют место как для классических систем, так и для квантовых систем. Существует обширная литература и известны различные неравенства для соотношений неопределенностей. Гейзенберг [1] впервые доказал соотношение неопределенностей для случая гауссовых состояний. Строгое неравенство приводит Кеннард [2]. Учет корреляций физических величин дается в неравенстве Робертсона – Шредингера [3, 4]. В дальнейшем получены другие неравенства, например Макконе – Пати [5], Озава [6] и Фудзикава [7]. В работе Мандельштама – Тамма [8] изучалось соотношение неопределенностей, если одна величина есть энергия. Все неравенства имеют место для величин в одном физическом состоянии. Целью настоящей работы является рассмотрение нескольких физических состояний, в которых возникают корреляции флуктуаций в этих системах.

1. Соотношения неопределенностей

Рассмотрим статистические характеристики физических величин, описываемых эрмитовыми операторами X, Y и оператором плотности смешанного состояния ρ . Выражения для флуктуаций и средних значений по ансамблю определяются известным образом:

$$\begin{aligned}\Delta X &= X - E(X), \quad E(X) = \text{Tr} X \rho, \\ \Delta Y &= Y - E(Y), \quad E(Y) = \text{Tr} Y \rho.\end{aligned}\tag{1}$$

Для дисперсий, являющихся вторыми центральными моментами, выпишем средние значения

$$\begin{aligned}D(X) &= E[(\Delta X)^2] = \text{Tr}(\Delta X)^2 \rho, \\ D(Y) &= E[(\Delta Y)^2] = \text{Tr}(\Delta Y)^2 \rho.\end{aligned}\tag{2}$$

Используем неравенство Коши – Буняковского – Шварца для операторов с приведенными статистическими характеристиками

$$D(X)D(Y) \geq E[(\Delta X \Delta Y)]E[(\Delta Y \Delta X)],\tag{3}$$

вытекающее известным способом из неравенства для определителя Грамма второго порядка для двух эрмитовых операторов

$$\Gamma(\Delta X, \Delta Y) = \begin{vmatrix} E[(\Delta X)^2] & E[(\Delta X \Delta Y)] \\ E[(\Delta Y \Delta X)] & E[(\Delta Y)^2] \end{vmatrix} = D(X)D(Y) - E[(\Delta X \Delta Y)]E[(\Delta Y \Delta X)] \geq 0,\tag{4}$$

где $\Delta Y \Delta X = (\Delta X \Delta Y)^*$ и индекс * означает сопряжение. Знак равенства (3) достигается тогда и только тогда, когда выполняется условие $\Delta X - \lambda \Delta Y = 0$.

О средних числах нейтрино в системе ν_e, ν_μ, ν_τ

В.В. Скобелев¹, В.П. Красин¹

¹Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

В рамках развиваемого одним из авторов подхода получены возможные значения дефицита солнечных электронных нейтрино. Результаты могут быть проверены в будущих экспериментах. Указано на перспективы развития метода вычислений.

Ключевые слова: дефицит, солнечные нейтрино, средние числа.

Введение

В предыдущей работе [1] одного из авторов в рамках развиваемого формализма [2] определен «процентный диапазон» относительных чисел регистрируемых на Земле электронных нейтрино ν_e по отношению к их количеству, генерируемому в центральных областях Солнца. Результат практически совпал с давно известными экспериментальными данными [3, 4] по «дефициту» солнечных электронных нейтрино. При использовании вероятностных представлений [1, 2] в рамках обычных методов квантовой механики [5, 6] представляется необходимым и возможным вычисление не только этого диапазона, а также и среднего значения $\langle E_e \rangle$ относительного числа ν_e

$$E_e \equiv \frac{N_e}{N}, N = N_e + N_\mu + N_\tau = \text{const} \quad (1)$$

в их системе $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$, достигающей Земли. Как указано в [1], это и есть та часть ν_e , которая достигает Земли при учете вероятностных взаимопревращений в этой системе.

Наряду с вычислением $\langle E_e \rangle$ следует, очевидно, указать и среднеквадратичное отклонение от этого среднего значения:

$$\sigma_e = \sqrt{\langle [\langle E_e \rangle - E_e]^2 \rangle} = \sqrt{\langle E_e^2 \rangle - \langle E_e \rangle^2}. \quad (2)$$

Такая информация, если ее получить в рамках нашего подхода к проблеме, будет, очевидно, более полной, чем полученная в [1]. В перспективе же она может быть проверена и в прецизионных экспериментах, подобных проведенным авторами работ [3, 4].

Эти вопросы по вычислению $\langle E_e \rangle$, σ_e и составляют содержание данной работы.

Предварительно следует привести некоторые необходимые для дальнейшего сведения из работ [1, 2].

1. Общие соотношения

Используемый в нашей работе [2] подход основан, в том числе на произвольной нумерации нейтрино сортов ν_e, ν_μ, ν_τ как 1, 2, 3 с выбором «сорта 3» в качестве базового с единственным ограничением на него $E_3 > E_{1,2}$ в физическом диапазоне используемых вероятностных переменных [2], причем $E_1 = E_2$ в силу «равноправия» в рамках этого нашего подхода остальных двух сортов по отношению к этому базовому.

Введенные в [1] вероятности переходов $i \rightarrow j, i \neq j, i, j \in \{1, 2, 3\}$ с их обозначением как x, y, z удовлетворяют либо системе алгебраических уравнений

$$xF' - yf' = 0, \quad (3a)$$

$$xF' + 2yzfF' - 1 = 0, \quad (3б)$$

либо системе

$$2yzfF' + (F'x)^2 + 2xyzfF'^2 - 1 = 0, \quad (4a)$$

$$xF' + 2yzfF' - 1 = 0. \quad (4б)$$

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.533.2

DOI: 10.17223/00213411/66/10/13

**Импульсная тренировка тонкопленочных катодов
на основе графитовых пленок**Д.В. Нефедов¹, Н.О. Шабунин¹

¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
г. Саратов, Россия

Показано, что в ходе тренировки тонкопленочных автоэмиссионных катодов импульсами напряжения микросекундной длительности происходит стабилизация и улучшение их автоэмиссионных параметров. Установлено, что воздействие на структуру полей критической величины вызывает возникновение и развитие токовой неустойчивости, приводящее к изменению эмиссионных свойств образца. Для определения момента окончания импульсной тренировки предлагается применять изменение первой производной коэффициента вариации.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, графитовые пленки, токовая тренировка, среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации.

Введение

Спектр углеродных материалов, которые могут быть использованы в качестве автоэмиссионных катодов (АЭК), очень широк [1], а список применения крайне разнообразен [2–4]. Углеродные тонкие пленки имеют свои значительные преимущества, в частности, возможность осаждения на большие площади [5], гибкие, прозрачные подложки [6], элементы микроэлектронных приборов [7], а их структура может варьироваться в широких пределах в зависимости от метода и условий осаждения [1].

Заметным недостатком любых АЭК является зависимость характеристик автоэлектронной эмиссии (АЭ) от геометрической формы эмиттера, которая может существенно меняться в ходе работы. Это происходит по причине воздействия неблагоприятных факторов, таких как ионная бомбардировка, наличие слоев адсорбированных молекул, пондеромоторные силы, взрывная эмиссия и т.д. [8]. В результате чего эмитирующая поверхность претерпевает серьезные морфологические изменения, вплоть до полного разрушения эмиттеров. Поэтому важным этапом в подготовке работоспособного катода является тренировка эмиссионных центров для получения стабильных и воспроизводимых характеристик.

Целью тренировки АЭК является устранение или компенсация изменений в морфологии и структуре эмиттеров для обеспечения их единообразия и стабильности работы. Оптимизация эмиссионной структуры может производиться самыми различными способами, включая ионную бомбардировку [9], лазерное воздействие, высокотемпературный отжиг, облучение различными частицами [10], но наиболее доступным способом является приложение к эмиссионной структуре высоких напряжений, что приводит к разогреву эмиссионных центров, возникновению пробоев, удалению адсорбированных молекул, отрыву от поверхности слабо закрепленных эмиссионных центров [11]. Например, в работе [12] приводилась покадровая съемка массивов алмазных острий при увеличении напряженности поля от 7 до 15 В/мкм, что привело к уменьшению длины алмазного наноострия и существенному увеличению его радиуса, а максимальный ток возрос в три с лишним раза. Также авторы отмечают, что в ходе измерений на постоянном токе при повышенной напряженности электрического поля наблюдались случайные дуговые разряды, в результате которых выходили из строя группы эмиттеров. Дальнейшие исследования продемонстрировали перспективность применения импульсов микросекундной длительности для массивов острий повышенной плотности. В работе [13] плоские протяженные катоды из графита, облученные ионами средних энергий, подвергались токовой тренировке в течение 30 мин при токоотборе 0.8 мА. При этом имело место смещение вольт-амперных характеристик (ВАХ) в область более высоких напряжений по сравнению с нетренированной поверхностью. В работе [14] упоминается трехсту-

Особенности приготовления керамических образцов из селенида цинка с использованием нанопорошков, синтезированных в лазерном факеле*

В.В. Осипов¹, В.В. Платонов¹, В.А. Шитов¹

¹ Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Представлены результаты исследований основных этапов получения оптической керамики из селенида цинка. Показано, что синтезированные в лазерном факеле нанопорошки из ZnSe, Cu:ZnSe, Fe:ZnSe имеют сравнительно большие средние размеры частиц (18 нм) и диапазон распределения по размерам (~ 70 нм) при производительности их получения 100 г/ч. Из этих нанопорошков методом горячего изостатического прессования синтезированы образцы керамики с пропусканием излучения ИК-диапазона до 40%. Найдено, что ионы Cu^{2+} , в отличие от ионов Fe^{2+} , не входят в двухвалентные позиции кристаллической решетки ZnSe. Обнаружено, что ионы Fe^{2+} выполняют роль спекающей добавки, повышая пропускание излучения.

Ключевые слова: лазер, излучение, нанопорошок, синтез, керамика, допирование, спектр пропускания.

Введение

Интерес к исследованиям селенида цинка поддерживается достаточно длительное время, что обусловлено его высокой прозрачностью в инфракрасном диапазоне и хорошими механическими свойствами [1]. Это вызвало его широкое использование в качестве материала для оптических элементов мощных CO_2 -лазеров и окон летательных аппаратов. Кроме того, Te:ZnSe и Al:ZnSe являются перспективными сцинтилляционными детекторами рентгеновского излучения в устройствах томографии и дозиметрии [2]. В последние годы все большее внимание уделяется созданию твердотельных лазеров, использующих в качестве матрицы селенид цинка: Co:ZnSe , Cu:ZnSe , Fe:ZnSe . Это связано с тем, что генерируемое ими длинноволновое излучение (2–6 мкм) соответствует окну прозрачности атмосферы и максимуму поглощения биологическими тканями (~ 2.9 мкм). Впервые лазерный эффект с использованием кристаллов Cr:ZnSe и Cr:ZnS в диапазоне длин волн 2.1–3.1 мкм был продемонстрирован в 1996 г. [3]. В результате достаточно интенсивных исследований их средняя генерируемая мощность достигла 140 Вт [4], а энергия в импульсе – 1.1 Дж [5]. Генерация излучения в кристаллах Fe:ZnSe на длинах волн 3.98–4.54 мкм впервые получена в работе [6]. На данный момент с использованием этого материала максимальная генерируемая средняя мощность составляет 20 Вт [7], а энергия в импульсе – 10.0 и 7.5 Дж при охлаждении жидким азотом и элементом Пельтье соответственно [8]. При этом наилучшие оптические качества благодаря достаточно высокому совершенству строения кристаллической решетки демонстрируют образцы, полученные методом CVD, где ZnSe образуется в реакции паров цинка с газообразным селеноводородом (H_2S), а затем осаждается на подложку [1]. Для допирования ZnSe ионами Co, Te, Cr, Fe или Cu их необходимо ввести в зону реакций паров этих веществ. Однако однородное допирование этими элементами затруднено из-за более высокой температуры их конденсации. Для преодоления этой трудности использовались различные подходы. Наибольшее применение получил метод, при котором допирование ионами переходных металлов осуществляется за счет термодиффузии [9]. Недостатком этого метода является малая глубина допирования, а значит, и малый объем активной среды, и неоднородное распределение ионов активатора по глубине. Попытки увеличить объем за счет расширения поверхности активного элемента наталкиваются на трудности, связанные с возникновением интенсивной спонтанной люминесценции, излучаемой на наибольшей длине поверхности и значительно снижающей эффективность генерации [10]. Ряд приемов в виде двустороннего допирования образца, диффузионной сварки допированных образцов [11], приготовление образца с внутренним легированным слоем в виде мениска [12] позволили уменьшить влияние этого недостатка на энергетику лазера, но не устранить его полностью.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20039, <https://rscf.ru/project/22-29-20039/>, при финансовой поддержке со стороны Правительства Свердловской области.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 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 19.10.2023. Выпуск в свет 24.10.2023. Заказ № 5623.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 14.88. Уч.-изд. л. 16.67. 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

