

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

7·2023

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Июль, 2023

№ 7 (788)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Насыров В.В., Насырова М.Г. Использование функции Йоста для расчета основного состояния атома лития5
- Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Ву Д.В., Коровин Ю.А., Купцов И.С., Спиридонова А.А. Особенности тестирования ядерных данных применительно к задачам трансмутации минорных актинидов.....13

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- Кизириди П.П., Озур Г.Е., Пегель И.В. Влияние собственного магнитного поля на конфигурацию радиально сходящегося сильноточного электронного пучка25
- Зятников И.А., Лосев В.Ф. О концентрации электронов в воздушной лазерной плазме, создаваемой фемтосекундными импульсами лазерного излучения34

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Лозовой К.А., Дирко В.В., Коханенко А.П., Куkenов О.И., Соколов А.С., Акименко Н.Ю., Войцеховский А.В. Двумерные материалы на основе элементов группы IIIA: развитие эпитаксиальных методов синтеза.....41

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Гладков С.О. О вычислении силы сопротивления вязкого шара, окруженного тонкой проницаемой мембраной, при его обтекании стационарным потоком жидкости51
- Солдатов А.И., Солдатов А.А., Егоров Ю.П., Костина М.А. Дифференциальный датчик для термоэлектрического контроля металлов и сплавов62

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Мочалов Л.А., Кудряшов М.А., Поляков А.Я., Прохоров И.О., Вшивцев М.А., Кудряшова Ю.П., Князев А.В., Алмаев А.В., Яковлев Н.Н., Черников Е.В., Ерзакова Н.Н. Физико-химические и электрофизические свойства тонких пленок β -Ga₂O₃/Zn, полученных методом PECVD66
- Иванов Ю.Ф., Шляров В.В., Аксенова К.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е. Увеличение усталостной долговечности сплава АК5М2 путем нанесения пленки Ti методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения74
- Девицкий О.В. Структурные свойства тонких пленок GaAs_{1-y}N_y, полученных методом импульсного лазерного напыления83

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Акинина М.Д., Плешков М.О., Светлик М.В., Демкин В.П., Старков Д.Н., Зайцев В.А., Удут В.В., Кингма Г. Определение геометрических параметров и динамических характеристик вестибулярного лабиринта животного на основе цифровой рентгеновской 3D-микротомографии92
- Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Слюнько Е.С., Юдин Н.Н., Подзвальный С.Н., Кальсин А.Ю., Лысенко А.Б., Власов Д.В., Черемис М.А. Разработка тонкопленочного покрытия Nb₂O₅/SiO₂ для зеркал резонатора параметрического генератора света на основе монокристалла ZnGeP₂101
- Суханов Д.Я., Росляков С.Н., Кузовова А.Е., Емельянов Ф.С. Захват и перемещение неоднородностей с поверхности ультразвуковым полем в воздухе110
- Дудин А.Н., Юрина В.Ю., Михайлов М.М., Ли Чундун, Нещименко В.В. Радиационная стойкость двухслойных полых частиц SiO₂/ZnO при облучении протонами.....117

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Тюменцев А.Н., Смирнов И.В., Пинжин Ю.П., Гриняев К.В., Дитенберг И.А., Чернов В.М. Особенности однородной деформации ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений на наномасштабном уровне в сплавах на основе ванадия126

CONTENTS

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Nasyrov V.V., Nasyrova M.G. Application of the Jost function for calculation of the ground state of the lithium atom 5
- Andrianov A.A., Andrianova O.N., Vu D.V., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Spiridonova A.A. Specifics of nuclear data testing in the context of the minor actinide transmutation problems 13

PLASMA PHYSICS

- Kiziridi P.P., Ozur G.E., Pegel I.V. Influence of self-magnetic field on configuration of radial converging high-current electron beam 25
- Zyatikov I.A., Losev V.F. Electron concentration in airborne laser plasma generated by femtosecond laser pulses 34

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Lozovoy K.A., Dirko V.V., Kokhanenko A.P., Kukenov O.I., Sokolov A.S., Akimenko N.Y., Voitsekhovskii A.V. Two-dimensional materials of group IIIA elements: development of epitaxial synthesis methods 41

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Gladkov S.O. Calculation of the Stokes force of a viscous ball surrounded by a thin porous membrane in an imperfect continuum 51
- Soldatov A.I., Soldatov A.A., Egorov U.P., Kostina M.A. Differential sensor for thermoelectric testing of metals and alloys 62

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Mochalov L.A., Kudryashov M.A., Polyakov A.Ya., Prokhorov I.O., Vshivtsev M.A., Kudryashova Yu.P., Knyazev A.V., Almaev A.V., Yakovlev N.N., Chernikov E.V., Erzakova N.N. Physico-chemical and electrophysical properties of thin β -Ga₂O₃:Zn films produced by the PECVD method 66
- Ivanov Yu.F., Shlyarov V.V., Aksenova K.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E. Increasing the fatigue life of AK5M2 alloy by the vacuum-arc plasma-assisted deposition of a Ti film 74
- Devitsky O.V. Structural properties of thin GaAs_{1-y}N_y films produced by pulsed laser deposition 83

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Akinina M.D., Pleshkov M.O., Svetlik M.V., Demkin V.P., Starkov D.N., Zaitsev V.A., Udut V.V., Kingma H. Determination of geometric parameters and dynamic characteristics of the animal vestibular labyrinth on the basis of 3D digital X-ray microtomography 92
- Kuznetsov V.S., Zinovev M.M., Slyunko E.S., Yudin N.N., Podzyvalov S.N., Kalsin A.Yu., Lysenko A.B., Vlasov D.V., Cheremis M.A. Development of an N₂O₅/SiO₂ thin-film coating for cavity mirrors of a parametric light generator based on a ZnGeP₂ single crystal 101
- Sukhanov D.Ya., Rosliakov S.N., Kuzovova A.E., Emelianov F.S. Capture and movement of inhomogeneities from the surface by ultrasonic field in air 110
- Dudin A.N., Iurina V.Iu., Mikhailov M.M., Li Chundong, Neshchimenko V.V. Radiation resistance of two-layer hollow SiO₂/ZnO particles under proton irradiation 117

BRIEF COMMUNICATIONS

- Tyumentsev A.N., Smirnov I.V., Pinzhin Y.P., Grinyaev K.V., Ditenberg I.A., Chernov V.M. Features of homogeneous deformation of BCC → HCP → BCC transformations at the nanoscale level in vanadium-based alloys 126

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 539.1

DOI: 10.17223/00213411/66/7/1

**Использование функции Йоста
для расчета основного состояния атома лития***В.В. Насыров¹, М.Г. Насырова²¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия² Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Представлен способ расчета основного состояния атома лития, основанный на поиске корней функции Йоста, численных для процесса рассеяния электрона на ионизированном атоме.

Ключевые слова: атом лития, связанное состояние, функция Йоста, упругое рассеяние, дифференциальное уравнение.

Введение

Отсутствие точного аналитического решения задачи о связанных состояниях многоэлектронных атомных систем привело к появлению множества различных методов построения приближенных волновых функций таких систем. Большинство подходов сводится к применению теории возмущений, вариационных методов или метода Хартри – Фока с разложением волновых функций по дискретным базисам.

В большинстве методов, применяемых для высокоточных расчетов систем даже с относительно небольшим количеством электронов, например атома лития [1], используется разложение по базисным функциям. Основная проблема таких методов заключается в относительно медленной сходимости численных алгоритмов, а приемлемая точность достигается при использовании базисного набора большого размера: от 100 базисных функций в работах [2, 3], до 3500 в [4] и 9576 в [5].

Можно отметить, что часто с увеличением размера матриц гамильтониана атомной системы, в силу не очень хорошей обусловленности, при выполнении операций диагонализации этих матриц требуется удерживать от 100 и более значащих цифр в численных расчетах. Кроме того, в методах, использующих разложения по базисам, для улучшения сходимости приходится использовать большое количество масштабирующих параметров, численные значения которых подбираются эмпирически. Современные вариационные методы, например [6], позволяют получить хорошие значения энергетического спектра для связанных состояний уже при относительно небольшом количестве вариационных параметров.

Подход, используемый в данной работе, основан на применении приближения «замороженного ядра», позволяющего выполнить последовательное упрощение гамильтониана многоэлектронной квантовой системы путем выделения «внешнего» электрона и описания его взаимодействия с оставшимся ионом. В отличие от большинства методов мы используем всего один подстановочный параметр – эффективный заряд ядра. Учет корреляции электронов квантовой системы осуществляется введением эффективного потенциала взаимодействия «внешнего» электрона и ионного остатка. Ранее такой подход был применен в работе [7] для расчета *s*-состояний атома гелия.

* Работа выполнена при поддержке Хабаровского отделения регионального научно-образовательного математического центра «Дальневосточный центр математических исследований» (договор с Минобрнауки от 16 февраля 2023 г. № 075-02-2023-932).

Особенности тестирования ядерных данных применительно к задачам трансмутации минорных актинидов*

А.А. Андрианов¹, О.Н. Андрианова¹, Д.В. Ву¹,
Ю.А. Коровин¹, И.С. Купцов¹, А.А. Спиридонова¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Обнинск, Россия

Выполнен обзор находящихся в открытом доступе экспериментальных нейтронно-физических данных для ряда актинидов ($^{238,241,240,242}\text{Pu}$, ^{237}Np , $^{241,242,242\text{m},243}\text{Am}$ и $^{242,243,244,245}\text{Cm}$) из международных баз данных Агентства по ядерной энергии ОЭСР и МАГАТЭ. Отмечена проблема наличия большого разброса имеющихся экспериментальных данных по нейтронным сечениям, а также ограниченное количество данных по сечениям захвата и неупругих взаимодействий, что приводит к большим неопределенностям при расчете реакторно-физических характеристик в задачах, связанных с трансмутацией минорных актинидов. Предложен порядок тестирования ядерных данных актинидов, предполагающий дополнение к традиционному подходу по сопоставлению расчетно-экспериментальных расхождений, анализ специально разработанных расчетных нейтронно-физических тестов с использованием различных оценок ядерных данных актинидов с целью выявления общих тенденций и закономерностей поведения характеристик взаимодействия нейтронов с ядрами в различных энергетических областях, диапазонов варьирования реакторно-физических характеристик и их погрешностей. На основе сформированной базы данных и созданного расчетного кода выполнено тестирование актуальных оцененных ядерных данных актинидов в задачах по определению критических параметров размножающихся систем, экспериментах со стандартными спектрами нейтронов и экспериментах на критических стендах по определению критичности размножающихся систем и спектральных индексов.

Ключевые слова: минорные актиниды, нейтронные сечения, оцененные ядерные данные, критические параметры, критические стенды, спектральные индексы.

Введение

Для проведения нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов, радиационной защиты и процессов в объектах ядерного топливного цикла требуется большой набор данных, характеризующих взаимодействие нейтронов с ядрами вещества. В этот набор должны быть включены различные типы данных для достаточно широкого диапазона энергий от долей эВ до десятков МэВ: нейтронные сечения взаимодействия, информация о резонансной структуре сечений, угловые и энергоугловые распределения вторичных частиц, числа и спектры мгновенных и запаздывающих нейтронов и пр.

Обоснование и оценка эффективности способов вовлечения минорных актинидов в топливный цикл ядерной энергетики с целью снижения радиационного воздействия высокоактивных отходов требует надежной информации по ядерным данным, характеризующим взаимодействие ядер-актинидов с нейтронами, что приводит к задаче тестирования имеющихся нейтронных данных актинидов ($^{238,241,240,242}\text{Pu}$, ^{237}Np , $^{241,242,242\text{m},243}\text{Am}$ и $^{242,243,244,245}\text{Cm}$) для их отбора и последующего использования при проведении нейтронно-физических расчетов.

Современное состояние знаний о ядерных данных актинидов отражают различные национальные библиотеки ядерных данных общего назначения: БРОНД 3.1 (Российская Федерация, 2016 г.) [1], ENDF/B-VIII.0 (США, 2018 г.), JENDL-5 (Япония, 2021), JEFF-3.3 и JEFF-4T1 (Европейский союз, 2017 г., новая тестовая версия 2022 г.), TENDL-2021 (Нидерланды, 2021 г.) [2]. Под оцененными ядерными данными понимается набор параметризованных и представленных в табличной форме данных, полученных в процессе обработки экспериментальных значений совместно с расчетными предсказаниями сечений и прочих характеристик на основе ядерных моделей. В результате комплексной, многоэтапной и итерационной процедуры на основе экспериментальных данных и с использованием алгоритмов ассимиляции данных получают параметры теоретических моделей, описывающих процессы взаимодействия нейтронов с ядрами вещества и их погрешно-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10154, <https://www.rscf.ru/project/23-29-10154>.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

DOI: 10.17223/00213411/66/7/3

Влияние собственного магнитного поля на конфигурацию радиально сходящегося сильноточного электронного пучка*П.П. Кизириди¹, Г.Е. Озур¹, И.В. Пегель¹¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Аналитически и с помощью численного моделирования исследован процесс формирования сильноточного электронного пучка в коаксиальном плазмонаполненном диоде. Получена аналитическая формула для критической величины тока пучка, при которой происходит его замагничивание. Численное моделирование показывает, что замагничивание электронного пучка приводит к периодическому возврату частиц в ускоряющий промежуток и стягиванию тока в центральную часть анода. Результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, взрывная эмиссия, собственное магнитное поле, численное моделирование.

Введение

Низкоэнергетические (10–30 кэВ) сильноточные (до 25 кА) электронные пучки (НСЭП) микросекундной длительности давно и широко используются для модификации поверхностных слоев металлических материалов методом импульсного плавления [1–5]. Большинство созданных к настоящему времени сильноточных электронных пушек имеют планарно-аксиальную геометрию и формируют цилиндрические пучки, транспортируемые вдоль силовых линий внешнего ведущего магнитного поля сквозь плазменный анод, обеспечивающий как транспортировку пучка, так и возбуждение взрывной эмиссии на катоде [6]. Однако для облучения протяженных изделий цилиндрической формы наиболее рационально использовать радиально сходящиеся пучки.

В работе [7] представлен созданный нами такой источник НСЭП. Его создание стало возможным благодаря разработке катодного узла со встроенными во взрывоэмиссионный катод резистивно развязанными дуговыми источниками плазмы [8], инициируемыми пробоем по поверхности диэлектрика. Использование данного катодного узла для возбуждения сильноточной электронной эмиссии позволяет обойтись без плазменного анода (который весьма затруднительно применить в коаксиальной геометрии диода), т.е. работать в режиме вакуумного или газонаполненного диода. При амплитуде ускоряющего напряжения 15–20 кВ средняя величина тока пучка на анод в [7] составляет 8–12 кА, что значительно превышает ток Альфвена (для планарно-аксиальной геометрии). Следовательно, можно ожидать, что собственное магнитное поле радиально сходящегося пучка, а также поле тока, растекающегося по цилиндрическому аноду, будут существенно влиять на структуру пучка, распределение его плотности тока и энергии вдоль анода. Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию и численному моделированию процесса формирования радиально сходящегося сильноточного электронного пучка, а также сопоставлению результатов расчетов с экспериментальными данными.

Модель процесса

При построении модели процесса будем исходить из фактической геометрии электронной пушки [9] и осциллограмм импульсов ускоряющего напряжения и тока на анод (рис. 1). Большинство экспериментов [9] проводилось в двухсекционном варианте катодного узла. Внутренний радиус кольцевых катодов каждой секции составлял $R_k = 4$ см, а радиус заземленного цилиндрического анода $R_A = 0.5$ см. Катоды секций соединялись между собой тонкостенным металлическим

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00070.

О концентрации электронов в воздушной лазерной плазме, создаваемой фемтосекундными импульсами лазерного излучения*

И.А. Зятиков¹, В.Ф. Лосев¹

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

Представлены результаты исследования концентрации электронов в плазме, создаваемой лазерным импульсом излучения на длине волны 950 нм с длительностью 60 фс, при его фокусировке в воздухе линзой с фокусными расстояниями от 15 до 100 см. Проанализирован механизм ионизации и показано, что в наших условиях эксперимента может работать как многофотонная, так и туннельная ионизация. С ростом фокусного расстояния концентрация электронов в плазме снижается примерно на два порядка.

Ключевые слова: лазерный пучок, фемтосекундная длительность импульса, концентрация электронов, лазерная плазма, многофотонная ионизация, туннельная ионизация.

Введение

В последнее десятилетие активно изучаются условия создания лазерной плазмы (филамента) при взаимодействии мощных лазерных импульсов излучения с газовыми средами. Это обусловлено перспективой ее применения для формирования различных типов когерентного излучения в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до терагерцовой области [1–4]. Типичные интенсивности лазерного излучения при этом составляют 10^{13} – 10^{15} Вт/см², которые создают в плазме концентрации электронов, по различным источникам, в достаточно большом диапазоне от 10^{14} до 10^{18} см⁻³ [5–10]. Физика образования плазмы в воздухе в настоящее время достаточно хорошо изучена. При распространении мощного импульса излучения в газе происходит поглощение излучения и образование электрон-ионных пар. При этом, согласно значению параметра Келдыша (адиабатичности) $\gamma = \omega(2m_e U_{\text{ion}})^{0.5}/eE = \omega/\omega_t$, ионизация может происходить либо за счет многофотонного процесса при $\gamma \gg 1$, либо за счет туннельного эффекта при $\gamma \ll 1$ [11–13]. Здесь ω – угловая частота излучения, ω_t – частота туннелирования, m_e – масса электрона, U_{ion} – потенциал ионизации атома или молекулы, e – заряд электрона, E – амплитуда электрического поля. Известно, что туннельная и многофотонная ионизация являются предельными случаями процесса нелинейной фотоионизации. Произведение времени туннелирования на частоту поля и есть параметр Келдыша. Таким образом, он показывает, успеет ли электрон протуннелировать под барьером за время его существования или нет. При $\gamma \gg 1$ время туннелирования велико по сравнению с полупериодом поля, и электрон не успевает покинуть атом за время существования барьера. Это случай относительно слабого поля ($E < 10^7$ В/см), в котором реализуется многофотонный механизм ионизации. В противном случае, при $\gamma < 1$, поле является сильным ($E > 10^7$ В/см), время туннелирования мало по сравнению с полупериодом поля и возможна эффективная туннельная ионизация. Следовательно, при фиксированной частоте излучения по мере увеличения его интенсивности сначала должна реализовываться многофотонная, а затем туннельная ионизация.

Следует также отметить, что параметр Келдыша прямо связан с так называемым пондеромоторным потенциалом $\gamma = (U_{\text{ion}}/2U_p)^{0.5}$ [13], который определяется из выражения $U_p = e^2 I / 4m_e \omega^2 = 9.33 \cdot 10^{-14} I \lambda^2$ [12, 14], где I – интенсивность лазерного излучения, λ – длина волны излучения. Смысл понятия пондеромоторного потенциала состоит в том, что, с одной стороны, это средняя энергия осцилляций свободного классического электрона в поле волны, а с другой, это квадратичный штарковский сдвиг высоковозбужденных ридберговских уровней и порога ионизации в световом поле. Таким образом, режим туннелирования ($\gamma \ll 1$) реализуется только при величине пондеромоторного потенциала (сдвига порога), превышающего половину потенциала ионизации атома или молекулы.

При взаимодействии высокоинтенсивного импульса излучения с воздухом образование электронов происходит за счет ионизации молекул азота и кислорода. При этом для разных интенсив-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-22-00023.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/66/7/5

**Двумерные материалы на основе элементов группы IIIА:
развитие эпитаксиальных методов синтеза***

К.А. Лозовой¹, В.В. Дирко¹, А.П. Коханенко¹, О.И. Кукунов¹,
А.С. Соколов¹, Н.Ю. Акименко², А.В. Войцеховский¹

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

² *Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия*

Рассмотрены двумерные аллотропные модификации одиночных элементов III группы: борофена (B), алюминена (Al), галленена (Ga), индиена (In) и таллена (Tl). Акцент сделан на их структурные параметры и технологические режимы в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, обеспечивающие получение качественных бездефектных двумерных структур большой площади для перспективных приборных приложений.

Ключевые слова: 2D-кристалл, бор, алюминий, галлий, индий, таллий, борофен, алюминен, галленен, индиен, таллен, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Введение

На сегодняшний день двумерные материалы являются одной из ключевых тем исследований для ученых всего мира [1–5]. С 2004 г., когда в работе Гейма и Новоселова [6] был экспериментально получен первый представитель нового класса материалов – монослой атомов углерода, наблюдается настоящий бум публикаций на эту тему. За прошедшие годы произошел количественный и качественный скачок в изучении самого графена и других двумерных аллотропных модификаций простых элементов – *трансграфенов*.

Этот интерес к двумерным материалам неудивителен, поскольку благодаря своим замечательным механическим, тепловым, электрическим, магнитным и оптическим свойствам они обещают произвести революцию в электронике. Среди выдающихся характеристик 2D-материалов можно выделить следующие: очень высокая подвижность носителей заряда, чрезвычайная прочность графена за счет прочных углерод-углеродных связей, возможность управлять энергетической структурой и шириной запрещенной зоны путем изменения состава материала, а также простая дефектная структура, обусловленная только наличием вакансий и примесей. Кроме того, при определенных условиях в этих материалах могут проявляться экзотические квантовые эффекты, они могут быть топологическими изоляторами и высокотемпературными сверхпроводниками. Уникальные свойства 2D-материалов делают их перспективными для создания совершенно новых типов устройств функциональной электроники, нанофотоники и квантовых технологий [7–12].

В настоящее время можно выделить следующие существующие двумерные аллотропные модификации простых веществ: графен (C), борофен (B), алюминен (Al), галленен (Ga), индиен (In), таллен (Tl), силицен (Si), германен (Ge), станен (Sn), плюмбен (Pb), фосфорен (P), арсенен (As), антимонен (Sb), висмутен (Bi), селенен (Se), теллурен (Te) [13]. На рис. 1 приводится часть периодической таблицы химических элементов, на которой выделены синтезированные на сегодняшний день одноэлементные двумерные материалы различных групп.

Среди методов создания двумерных материалов следует отличать простое механическое отслаивание от объемных материалов, методы химического осаждения и молекулярно-лучевую эпитаксию. Именно последний метод позволяет получать структуры наилучшего качества: с малой шероховатостью, контролируемой толщиной и высокой степенью однородности по площади подложки. Для достижения желаемого качества особое внимание необходимо уделить выбору подходящей подложки и тщательному контролю условий осаждения, таких как температура и скорость роста.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10031, <https://rscf.ru/project/21-72-10031/>.

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.5.013.12

DOI: 10.17223/00213411/66/7/6

О вычислении силы сопротивления вязкого шара, окруженного тонкой проницаемой мембраной, при его обтекании стационарным потоком жидкостиС.О. Гладков¹¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

Приведено общее выражение для силы сопротивления вязкого шара, находящегося внутри очень тонкой мембраны, при его обтекании стационарным потоком вязкого континуума. Задача решена для трех разных граничных условий. В предельных частных случаях приводится сравнение полученных общих формул с известными результатами. Показано, что для всех трех случаев, если пористость мембраны возрастает, сила сопротивления должна уменьшаться.

Ключевые слова: закон Дарси, пористость, уравнение Навье – Стокса, уравнение непрерывности, граничные условия.

Введение

Исследование свойств пористых тел при их обтекании (или движении) в вязком континууме ведется уже сравнительно давно и продолжается в настоящее время, свидетельством этого могут служить, например, работы [1–24]. Здесь интересно отметить, что при получении конечных аналитических результатов важную роль в окончательном ответе играет формулировка граничных условий. Вполне понятно, что чувствительность окончательного результата при изменении граничной задачи должна приводить и к качественно разным трактовкам исследуемого явления.

Что касается конкретно нашей задачи, о которой ниже пойдет речь, то ее аналитическое решение дополняет упомянутые выше исследования. Однако необходимо заметить, что тот анализ, который мы сейчас подробно изложим, ранее другими авторами не приводился.

Действительно, например, в работе [25] рассматривалась капля, окруженная газовой оболочкой при ее движении в пористом континууме, а в работе [26] приводится исследование обтекания вязким потоком полого шара, окруженного пористой оболочкой конечного размера.

Целью настоящей работы является задача вычисления силы Стокса, которую испытывает вязкий шар, окруженный предельно тонкой пористой мембраной для случая трех различных граничных условий.

Шар считаем неподвижным, а обтекающий его поток стационарным. Скорость потока обозначим буквой $\mathbf{u}$, а его динамическую вязкость – η . Также, как и в задаче Стокса, речь будет идти о пограничной области вблизи внешней части мембраны.

Решение поставленной задачи мы проиллюстрируем на примере трех качественно различных граничных условий, которые сформулируем по мере изложения ниже.

1. Решение основного уравнения гидродинамики в стоксовом приближении

Поставленную задачу можно решить, если воспользоваться стационарными уравнениями Навье – Стокса и уравнением непрерывности, которые представим в стандартном виде [27] соответственно:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \eta \Delta \mathbf{v}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность внешнего потока; P – давление.

Дифференциальный датчик для термоэлектрического контроля металлов и сплавов

А.И. Солдатов^{1,2}, А.А. Солдатов¹, Ю.П. Егоров¹, М.А. Костина^{1,2}

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

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Представлена конструкция датчика для реализации дифференциального метода измерения термоЭДС. В едином конструктиве объединены два горячих электрода, имеющих общую систему нагрева и стабилизации температуры. Такое конструктивное решение повысило удобство работы оператора с датчиком. За счет обеспечения одинакового теплового режима в точках контакта горячих электродов с испытуемым и контрольным образцами обеспечивается высокая повторяемость результатов контроля. Предложенная конструкция дифференциального датчика используется в приборе термоэлектрического контроля «ТЕРМОТЕСТ».

Ключевые слова: термоЭДС, дифференциальный датчик, электрод, коэффициент Зеебека.

Термоэлектрический метод находит широкое применение для экспресс-контроля металлов и сплавов [1–4]. Для возникновения термоЭДС необходим тепловой и электрический контакт горячего и холодного электродов с контролируемым образцом, при этом между горячим и холодным электродами должна быть неизменная разность температур. В практике неразрушающего контроля используют простую или дифференциальную схемы измерения термоЭДС. Дифференциальная схема имеет несомненные преимущества за счет более высокой чувствительности и повторяемости результатов контроля, так как температурный режим в точках контакта горячего электрода с эталонным и контролируемым образцами будет одинаковым. Широко распространенная схема для измерения дифференциальной термоЭДС показана на рис. 1 [5].

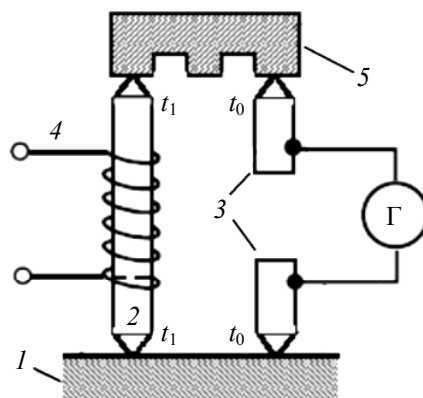


Рис. 1. Типовая схема для измерения дифференциальной термоЭДС

Схема состоит из горячего электрода 2 с нагревающим элементом 4, который нагревает горячий электрод до температуры t_1 , двух холодных электродов 3 с температурой t_0 , испытуемого образца 1, эталона 5 и гальванометра Г.

Температуру t_1 горячего электрода измеряют с помощью термопары, температуру t_0 холодного электрода (как правило, это температура окружающей среды) измеряют с помощью второй термопары (возможно использование и других датчиков температуры). Дифференциальная термоЭДС E_{dif} получается между двумя холодными электродами. Выражение для определения дифференциальной термоЭДС имеет вид

$$E_{\text{dif}} = \Delta T(a_X - a_{\text{ref}}),$$

где a_{ref} – коэффициент Зеебека эталона; a_X – коэффициент Зеебека контролируемого образца; $\Delta T = t_1 - t_0$.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.9

DOI: 10.17223/00213411/66/7/8

Физико-химические и электрофизические свойства тонких пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$, полученных методом PECVD*

Л.А. Мочалов¹, М.А. Кудряшов¹, А.Я. Поляков², И.О. Прохоров¹,
М.А. Вшивцев¹, Ю.П. Кудряшова¹, А.В. Князев¹, А.В. Алмаев³,
Н.Н. Яковлев³, Е.В. Черников³, Н.Н. Ерзакова³

¹ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

³ ООО «Фокон», г. Калуга, Россия

Впервые тонкие пленки системы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ (содержание Zn от 0 до 10 ат.%) были получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) в условиях низкотемпературной неравновесной плазмы индуктивно-связанного высокочастотного (40.68 МГц) разряда при пониженном давлении (0.01 Торр). При этом непосредственно высокочистые элементы – металлические высокочистые галлий и цинк, а также высокочистый кислород использовали в качестве источников макрокомпонентов. Были изучены химический состав, морфология поверхности, спектры комбинационного рассеяния полученных тонких пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$, а также спектры катодной люминесценции и электрофизические свойства.

Ключевые слова: тонкие пленки, оксид галлия, катодная люминесценция, электрические свойства.

Введение

В последнее время $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ привлекает все более пристальное внимание в связи с вновь открывшимися возможностями его потенциального применения в качестве основы для создания новых полупроводниковых элементов и различных оптоэлектронных устройств [1]. Однако одним из лимитирующих факторов создания таких устройств является синтез $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, легированного примесями p -типа, что имеет большое значение для производства, например, p - n -диодов, имеющих меньший обратный ток утечки при высоком напряжении по сравнению с диодами с барьером Шоттки (SBD) из-за более высокого потенциального барьера [2, 3]. Несмотря на то, что последние теоретические исследования показали возможность использования Zn в качестве легирующей примеси p -типа [4–6], синтез $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ p -типа до сих пор остается нерешенной технологической задачей.

Кроме того, в работе [1] сообщается об изготовлении и характеризации солнечно слепых фотодетекторов (SBP) на основе эпитаксиальных пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ с высокой концентрацией носителей заряда ($5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и длиной волны отсечки 260 нм, перспективных для различных военных и гражданских применений, включая обнаружение пламени, перехват ракет, очистку воздуха и воды, а также космической связи.

Исследователями во всем мире предпринимаются попытки адаптировать традиционные «классические» методы синтеза тонких пленок для создания материалов системы $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:ZnO}$ – импульсное лазерное осаждение, термическое испарение в вакууме, высокочастотное распыление, осаждение металлоорганических соединений из газообразной фазы (MOCVD), химическое осаждение из газовой фазы при низком давлении (LPCVD) и т.д. Например, в работе [1] эпителийные слои были выращены на c -plane сапфире методом металлоорганического осаждения из газовой фазы, и их структурные, электрические и оптические свойства были охарактеризованы различными методами. Авторами работы [5] тонкие пленки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ (с содержанием Zn до 7%) были получены с помощью импульсного лазерного осаждения (PLD), изучены их электрофизические свойства, а также механизмы излучения. В работе [7] тонкие пленки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ были получены методом магнетронного распыления с последующим термическим отжигом, а также изучены их оптические

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00053 «Разработка научных основ технологии получения хеморезистивных материалов для электронного носа на основе сложных наноструктурированных оксидных матриц».

Увеличение усталостной долговечности сплава АК5М2 путем нанесения пленки Ti методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения*

Ю.Ф. Иванов¹, В.В. Шляров², К.В. Аксенова², Д.В. Загуляев², В.Е. Громов²

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

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Выполнены циклические испытания на многоцикловую усталость образцов силумина марки АК5М2 с предварительно напыленной на рабочую поверхность пленкой титана толщиной 1, 3, 5 мкм. Показано, что с увеличением толщины h пленки титана усталостная долговечность силумина возрастает, достигая максимального значения $N_5 = 245274$ при $h = 5$ мкм, что в 2.2 раза выше, чем у образцов силумина без напыления ($N_0 = 113742$). Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что поверхность разрушения образцов силумина, независимо от толщины напыляемой пленки титана, характеризуется тремя зонами: зоной усталостного роста трещины, зоной ускоренного роста трещины и зоной долома. Установлено, что при усталостном нагружении образцов силумина с нанесенной пленкой титана толщиной 5 мкм критическая длина трещины (ширина зоны усталостного роста трещины) возрастает в 1.1 раза (относительно исходного образца), увеличивая тем самым ресурс работоспособности материала. Показано, что среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах силумина зависит от толщины напыленной пленки титана и при толщине пленки 5 мкм оно в 2 раза меньше по отношению к образцу, разрушенному при отсутствии пленки титана. Таким образом, образцы силумина АК5М2 с предварительно напыленной пленкой титана толщиной 3–5 мкм обладают более высокой сопротивляемостью распространению усталостной трещины, что является причиной максимального увеличения их усталостной долговечности.

Ключевые слова: силумин АК5М2, пленка Ti, вакуумно-дуговое плазменно-ассистированное осаждение, многоцикловая усталость, поверхность излома.

Введение

Усталость металла – это процесс разрушения металлических конструкций под воздействием циклических нагрузок, которые в течение продолжительного времени действуют на материал [1]. Этот процесс может быть вызван различными факторами, включая механические [2], термические или коррозионные воздействия [3–5]. При каждом цикле нагрузки металл начинает деформироваться и возвращаться в исходное положение. Однако при достижении определенного количества циклов нагрузки металл начинает терять свою прочность и становится более восприимчивым к трещинам и разрывам.

Многие металлические конструкции, такие как мосты, авиационные и космические корабли и промышленные машины, подвержены усталости [6–8]. Чтобы избежать разрушения конструкций, необходимо проводить регулярную инспекцию и обслуживание, а также использовать материалы и технологии, которые устойчивы к усталостному разрушению.

Экспериментальным путем давно установлено, что разрушение материала всегда начинается именно с поверхности. Наиболее важными факторами, влияющими на усталостную долговечность, являются:

1. Шероховатость поверхности: поверхность с высокой шероховатостью может создавать концентраторы напряжений и повышать вероятность возникновения трещин, что может снижать усталостную долговечность [9, 10].
2. Повреждения поверхности: царапины, вмятины и другие повреждения поверхности могут служить местом для начала трещин и повлиять на усталостную долговечность [11, 12].
3. Химическая структура: некоторые металлические материалы могут иметь поверхностные слои, которые отличаются по химическому составу от более глубоких слоев. Это может влиять на поведение материала при усталости [13, 14].

Для улучшения прочности металла и снижения вероятности разрушения конструкций из-за усталости используются различные методы, такие как термическая обработка [15, 16], добавление специальных присадок [17], применение различных технологий поверхностной обработки [18–20].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

Структурные свойства тонких пленок $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$, полученных методом импульсного лазерного напыления*

О.В. Девицкий^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия

² Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

Методом импульсного лазерного напыления из мишени GaAs в атмосфере аргоно-азотной газовой смеси была получена тонкая пленка $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ толщиной 188 нм на подложке GaAs с ориентацией (100). Определено, что тонкая пленка имеет состав $\text{GaAs}_{0.9886}\text{N}_{0.0114}$, выращена псевдоморфно. Методами рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света установлено, что полученная тонкая пленка имеет эпитаксиальную структуру и сравнительно высокое кристаллическое совершенство. Параметр кристаллической решетки тонкой пленки составил 0.563843 нм, а средний размер области когерентного рассеяния был равен 20.74 нм. Внедрение атомов азота в кристаллическую решетку GaAs доказано появлением на спектрах комбинационного рассеяния света локальной колебательной моды GaN на частоте 476.9 см^{-1} . Было проведено сравнение составов пленки, определенных методом рентгеновской дифракции, спектроскопии комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции. Показано, что положение максимума фотолюминесценции для пленки $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ составляет 1.221 эВ. Отмечено, что расхождение в значении состава обусловлено тем, что спектроскопия комбинационного рассеяния света учитывает только внедренные в анионную подрешетку атомы азота и не учитывает те атомы азота, которые находятся в положении интерстиции.

Ключевые слова: тонкие пленки, импульсное лазерное напыление, III–V–N, рентгеновская дифракция, спектроскопия комбинационного рассеяния света.

Введение

Тонкие пленки $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ имеют перспективу широкого применения для создания лазеров с улучшенными температурными характеристиками в волоконно-оптических линиях связи и телекоммуникационных системах [1], фотодетекторах [2], высокоэффективных солнечных элементах [3]. Из-за значительного отличия ковалентного радиуса атомов азота (71 пм) и мышьяка (122.5 пм) в кристаллической решетке $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ возникают спин-орбитальное расщепление в валентной зоне и существенные деформации растяжения. $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ демонстрирует высокую нелинейность зависимости ширины запрещенной зоны от состава, так, например, в работе [4] установлено, что внедрение 1–4 мол.% азота в GaAs снижает ширину запрещенной зоны $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ на 173 мэВ/Н ат.%. Основными методами получения тонких пленок $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ являются молекулярно-лучевая эпитаксия с плазменным активированием азота, газофазная эпитаксия металлоорганических соединений, низкотемпературная жидкофазная эпитаксия в среде молекулярного азота [5–7]. Максимальная доля внедренного азота в тонких пленках $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ составляет 5 мол.% [8], при попытках большего увеличения внедренной доли азота структурные свойства тонких пленок ухудшаются настолько, что полностью лишают возможности приборного применения. Было установлено, что основной причиной этого являются неравновесные условия получения $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ при относительно низких температурах, которые необходимы для встраивания атомов азота в тонкие пленки III–V–N, и из-за этого происходит достаточно сильное дефектообразование. Проблема дефектообразования при получении тонких пленок $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ является критическим фактором их приборного применения и требует простых и эффективных методов решения. Сложность встраивания азота из газовой среды при получении тонких пленок $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ связана, прежде всего, с большой энергией связи молекулярного азота N_2 (9.76 эВ), не позволяющей активировать молекулярный азот при стандартных температурах роста тонких пленок. В качестве источника активных ионов азота, способных встроиться в растущую тонкую пленку, в настоящее время применяются плазменные источники с высокочастотным возбуждением [9–10]. Для высокочастотных источников азота основной проблемой является низкая степень активации азота (не более 10–15%) и повреждения

* Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ЮНЦ РАН № 122020100326-7, а также с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета и при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687).

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 531.7

DOI: 10.17223/00213411/66/7/11

**Определение геометрических параметров
и динамических характеристик вестибулярного лабиринта животного
на основе цифровой рентгеновской 3D-микротомографии***

М.Д. Акинина¹, М.О. Плешков², М.В. Светлик¹, В.П. Демкин¹,
Д.Н. Старков², В.А. Зайцев¹, В.В. Удут^{1,3}, Г. Кингма⁴

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

² *Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия*

³ *НИИ фармакологии и регенеративной медицины им. Е.Д. Гольдберга Томского НИМЦ, г. Томск, Россия*

⁴ *Университет Маастрихта, г. Маастрихт, Нидерланды*

Подобие анатомической структуры вестибулярного лабиринта у разных лабораторных животных и человека предоставляет возможность изучения фундаментальных физических и электрофизиологических принципов работы вестибулярной системы с использованием различных моделей на животных и понимания процессов, лежащих в основе различных патологий и потенциальных методов лечения вестибулярной гипофункции. В данной работе проведены измерения и анализ геометрических параметров вестибулярного органа крысы на основе микро-КТ-изображений высокого разрешения, необходимых для разработки математических моделей вестибулярной системы позвоночных животных. Изображения вестибулярного органа лабораторного животного были получены с помощью микрокомпьютерной томографии с разрешением не менее 7 мкм. Изображения были реконструированы в 3D-изображения, сегментированы и преобразованы в 3-мерную модель для определения геометрических размеров и вычисления динамических характеристик вестибулярных сенсоров угловых ускорений. Показано, что большинство геометрических параметров вестибулярного лабиринта у крысы схожи с имеющимися в литературе данными человека. Достигнутая точность измерений геометрических параметров и получение детализированной анатомической структуры внутреннего уха лабораторного животного позволили провести прецизионные лабораторные и численные эксперименты по исследованию физиологических свойств вестибулярного лабиринта. Результаты данной работы будут полезны для разработки детализированных физико-математических моделей распространения электрического тока в вестибулярном лабиринте и могут быть использованы при разработке новых прототипов вестибулярных имплантов.

Ключевые слова: вестибулярная система, внутреннее ухо, анатомическая структура, морфологические особенности лабиринта, микро-КТ, моделирование вестибулярного органа, вестибулярный имплант.

Введение

Вестибулярная система человека является важной сенсорной системой, отвечающей за обработку и передачу в головной мозг информации о положении тела и его перемещении в пространстве. Недостаточность или полное отсутствие данной сигнальной функции вызывает постуральную нестабильность, нарушение зрения во время движения головы и нарушение равновесия [1, 2].

Наши знания о вестибулярной сенсорной системе, ее функциональной значимости для стабилизации взгляда и положения тела, способности обеспечивать точное восприятие пространственной ориентации и пространственную навигацию основаны на комплексном исследовании структуры и физиологии вестибулярного органа. В настоящее время устройство вестибулярной системы изучено подробно, однако это не отражает полного понимания процессов и механизмов формирования потенциала действия и его распространения в вестибулярном нерве. Более того, использование уже имеющихся моделей вестибулярного лабиринта не дает возможности создавать адекватные функциональные аналоги в вестибулярном импланте [3].

Раздражение вестибулярных рецепторов вызывает целый ряд сложных вегетативных и соматических реакций. Понимание рефлекторных цепочек вестибулярных рефлексов является важнейшей основой для разработки «правильных» моделей, описывающих вестибулярные функции: вестибуло-окулярный рефлекс, вестибуло-спинальный рефлекс, восприятие движения и динами-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00259, <https://rscf.ru/project/23-25-00259/>.

Разработка тонкопленочного покрытия $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ для зеркал резонатора параметрического генератора света на основе монокристалла ZnGeP_2

В.С. Кузнецов^{3,4}, М.М. Зиновьев^{1,2,3}, Е.С. Слюнько^{2,3},
Н.Н. Юдин^{1,2,3}, С.Н. Подзывалов^{2,3}, А.Ю. Кальсин^{2,3},
А.Б. Лысенко^{2,3}, Д.В. Власов², М.А. Черемис^{2,3}

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

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

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

⁴ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Получены оптические дисперсии показателей преломления и коэффициентов поглощения в широком спектральном диапазоне длин волн для Nb_2O_5 и SiO_2 . Произведены расчеты диэлектрических зеркал резонаторов параметрических генераторов света с использованием данных оксидных материалов. Определены оптимальные значения газовой смеси и ускоряющие напряжения для распыления используемых материалов ионно-лучевым методом. Проведены работы по тестированию оптических покрытий на адгезию к подложке и их истиранию. Показана возможность создания диэлектрического зеркала, работающего в диапазоне 3.5–5 мкм на сапфировой подложке.

Ключевые слова: тонкие пленки, интерференционные покрытия, параметрический генератор света, ионно-лучевое распыление, подложка.

Введение

Нанесение оптических интерференционных покрытий – сложный комплексный процесс нанесения многослойной пленочной структуры на различные подложки [1]. Для создания оптических резонаторов лазеров, используемых, в том числе и в лидарных системах [2], применяются диэлектрические зеркала, структурно сформированные чередованием различных оптически-прозрачных в заданной области спектра материалов [3].

Основные требования, предъявляемые к таким зеркалам, – это необходимый уровень отражения (пропускания) в целевой области спектра [4] и их порог лазерно-индуцированного пробоя (ПЛИП) [5, 6]. Для производства зеркал в ИК-области спектра успешно используются как оксидные материалы, так и зеркала, созданные на основе фторидов, сульфидов и теллуридов. Последние обладают широкой областью прозрачности в диапазоне длин волн от 0.8 до 12–13 мкм [7]. Оксидные материалы, ввиду наличия в них металл-кислородной связи М–О [8], обладают существенно меньшей полосой пропускания, поглощение в этих материалах начинается на длине волны 7–8 мкм. Однако оксиды имеют существенные преимущества по термомеханическим показателям – у этих материалов высокая температура плавления (более 1500 °С) и высокая механическая прочность (3–4 класс на истирание, согласно [9]), что обеспечивает долговечность покрытия, сопротивляемость к появлению царапин и истираемости.

Данная работа посвящена созданию диэлектрических зеркал для резонатора параметрического генератора света (ПГС) на основе оксидов, работающего в среднем ИК-диапазоне 3–5 мкм при накачке его излучением Ho:YAG -лазером с длиной волны 2.097 мкм. В качестве материала подложек, на которые наносились покрытия, был выбран сапфир диаметром 12.7 мм. Данные подложки прозрачны как в диапазоне накачки на длине волны 2.097 мкм, так и в диапазоне генерации ПГС – 3–5 мкм. Зеркала должны обладать высоким значением ПЛИП для их эффективного использования, поэтому были выбраны следующие оксидные материалы для нанесения на сапфировую подложку: слой с высоким показателем преломления Nb_2O_5 , низкопреломляющий слой – SiO_2 [10]. Согласно литературным данным, эти материалы обладают высоким ПЛИП, например, в работе [11] лучевая прочность монослоя Nb_2O_5 составила порядка 13 Дж/см², в то время как SiO_2 обладает значением ПЛИП на уровне 30–40 Дж/см² [12]. Стоит отметить, что данные были получены для моноимпульсного режима.

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0038.

Захват и перемещение неоднородностей с поверхности ультразвуковым полем в воздухе*

Д.Я. Суханов¹, С.Н. Росляков¹, А.Е. Кузовова¹, Ф.С. Емельянов¹

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

Предлагается метод перемещения неоднородностей различного типа с плоских поверхностей с помощью ультразвукового поля в воздухе. В качестве неоднородностей рассматриваются как твердые частицы, так и градиентные неоднородности воздуха, вызванные нагревом. Ультразвуковая система перемещения основана на двух ортогонально ориентированных сфокусированных в одной точке решетках ультразвуковых излучателей монохроматического поля с линейной перестройкой разности фаз от времени. Система излучателей располагается так, что точка фокуса решеток находится на поверхности, а плоскости решеток – под углом 45° к поверхности. Экспериментально показана возможность перемещения частиц пенополистирола и слоя нагретого воздуха с поверхности. Эксперименты проводились на частотах 40000 и 40020 Гц.

Ключевые слова: акустический захват, термоакустика, ультразвуковая левитация.

Введение

Методы акустического захвата и управления частицами привлекают существенное внимание современных исследователей. Явление акустического захвата применяется при разработке акустических пинцетов; установок для управляемых химических реакций с дозированной подачей реактивов; систем бесконтактного химического анализа оптическими методами. Разработаны системы левитации на основе фазированных решеток узкополосных [1–7] и широкополосных [8, 9] излучателей.

В работе [10] проведены исследования изменения влажности левитирующей в акустическом поле частицы из цеолита и специальных добавок при различных температурах от 60 до 100°C . Однако не рассматривались термоакустические эффекты и возможность управления движением частиц при изменениях свойств среды.

Одним из направлений исследований в области термоакустики является разработка систем локального охлаждения. В настоящее время разработаны методы исследования полей температур и конвекционных потоков в воздухе [11]. При этом подобные исследования не сосредоточены на вопросе левитации частиц в ультразвуковом поле.

Нестационарные широкополосные и сверхширокополосные акустические сигналы предоставляют дополнительную степень свободы в управлении акустическим полем. В работе [12] предложено аналитическое решение для силы акустического давления короткоимпульсных волновых пучков на малоразмерную сферу для произвольных импульсных сигналов. Ранее авторами в [8, 9] экспериментально показана возможность левитации и управления частицами в широкополосном ультразвуковом поле. Однако термоакустические эффекты не изучались.

В данной работе рассматривается возможность перемещения не только частиц, но и неоднородностей в виде нагретого воздуха с помощью ультразвукового поля. Исследование такого рода неоднородностей актуально при захвате и транспортировке частиц с поверхностей бесконтактным способом, для дистанционного охлаждения поверхностей.

Описание системы ультразвукового перемещения неоднородностей

Предлагается использовать систему из двух одинаковых сфокусированных решеток ультразвуковых излучателей с апертурой B . Каждая решетка сфокусирована на дальность H в точку напротив центра апертуры. Для длины волны λ решетка обеспечивает пятно фокусировки диаметром около $H\lambda/B$. В области пятна фокусировки создается локально плоская волна, направленная от излучающей решетки. Решетки размещаются таким образом, что их волны сфокусированы в одной точке на плоской поверхности. При этом решетки ориентированы под углом 45° к плоской поверхности (рис. 1). Предполагается, что в точке фокуса на поверхности находятся малоразмер-

* Работа выполнена при поддержке гранта № 23-22-00056 Российского научного фонда.

Радиационная стойкость двухслойных полых частиц SiO_2/ZnO при облучении протонами*

А.Н. Дудин¹, В.Ю. Юрина¹, М.М. Михайлов², Чундун Ли³, В.В. Нещименко¹

¹ Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

³ Харбинский политехнический университет, г. Харбин, КНР

Проведен анализ спектров диффузного отражения двухслойных полых частиц SiO_2/ZnO и объемных микрочастиц ZnO в диапазоне длин волн от 200 до 2500 нм до и после их облучения протонами с энергией 100 кэВ. Также проведено моделирование воздействия протонов на ансамбль полых двухслойных частиц в среде GEANT4. Согласно результатам экспериментов и расчетов, радиационная стойкость полых частиц SiO_2/ZnO выше, чем у объемных микрочастиц ZnO . Вероятными причинами увеличения радиационной стойкости полых частиц могут быть высокая удельная поверхность, которая служит стоком радиационных дефектов, а также наличие фаз SiO_2 , ZnSiO_3 и Zn_2SiO_4 , которые формируют центры поглощения в УФ-области спектра и снижают их концентрацию в видимой области спектра.

Ключевые слова: оксид цинка, диоксид кремния, полые частицы, двухслойные частицы, деградация, оптические свойства, радиационная стойкость, дефекты, протоны, облучение.

Введение

Исследования, направленные на изменение свойств поверхностей оксидных микро- и наночастиц аморфным диоксидом кремния [1–5], продемонстрировали успешность создания материалов с улучшенными физико-химическими свойствами. В частности, применение диоксида кремния в качестве модифицирующей добавки для создания порошков-пигментов терморегулирующих покрытий на основе оксида цинка показало высокую отражательную способность [6, 7].

Ранее проведенные исследования влияния морфологии поверхности частиц оксида цинка на их оптические свойства и радиационную стойкость показали [8–11], что полые частицы микронных размеров проявляют меньшую деградацию оптических свойств под действием протонов и электронов, чем объемные частицы.

Цель данного исследования заключается в изучении оптических свойств и радиационной стойкости двухслойных полых частиц SiO_2/ZnO микронных размеров сферической формы, которые могут служить в качестве пигментов терморегулирующих покрытий космических аппаратов.

Методика эксперимента

Для проведения исследования были использованы микропорошки ZnO и SiO_2 фирмы «Aladdin Chemistry» с очень высокой чистотой – 99.99% для ZnO (CAS: 1314-13-2) и 99.98% для SiO_2 (CAS: 7631-86-9). Средний размер частиц в микропорошках составляет от 0.7 до 5 мкм.

Двухслойные полые частицы SiO_2/ZnO формировались при смешивании коллоидного раствора полистирольных частиц, этанола, 3-триэтоксисилпропиламина и тетраэтилортосиликата в соотношении по объему 25:250:1:5 в течение 1 ч при температуре 50 °С с последующим добавлением ацетата цинка и 25%-го раствора гидроксида аммония в соотношении 5:25 к первичному раствору. После этого полученный раствор перемешивался в течение 2 ч при температуре 50 °С. Затем полученный продукт был промыт несколько раз спиртом и высушен при 60 °С на воздухе. Далее осуществляли ступенчатую термообработку от 200 до 600 °С в течение 4 ч.

Для анализа морфологии поверхности были использованы растровый электронный микроскоп Helios NanoLab 660 и просвечивающий электронный микроскоп JEOL JEM-2100.

Для элементного анализа использовалась энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия на электронном микроскопе фирмы «Bruker», с детектором XFlash 5010. Удельная поверхность синтезированных двухслойных полых частиц SiO_2/ZnO была измерена методом Брунауэра – Эммет-

* Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 122082600014-6 (FZMU-2022-0007).

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.911; 548.4; 669.292.5; 620.186.8

DOI: 10.17223/00213411/66/7/15

Особенности однородной деформации ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений на наномасштабном уровне в сплавах на основе ванадия*

А.Н. Тюменцев^{1,2}, И.В. Смирнов^{1,2}, Ю.П. Пинжин^{1,2},
К.В. Гриняев^{1,2}, И.А. Дитенберг^{1,2}, В.М. Чернов³

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

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

³ АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара», г. Москва, Россия

Представлены результаты электронно-микроскопического исследования микроструктуры и упруго-напряженного состояния в зонах ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений, формирующихся в малоактивируемых ванадиевых сплавах после испытаний на ударную вязкость. Обнаружена активизация этих превращений на наномасштабном структурном уровне с формированием нанообъемов размерами несколько нанометров, способных быть носителями однородной деформации сжатия – растяжения типа деформации Бейна. Обсуждаются механизмы такой деформации и роль указанных выше превращений в явлениях сверхвысокой технологической пластичности и значительного снижения температуры хладноломкости.

Ключевые слова: ванадиевые сплавы, ударное воздействие, наномасштабный уровень деформации.

Представления об обратимых (прямые плюс обратные) мартенситных превращениях (ОМП) с изменением систем обратных превращений открывают новые возможности для описания многочисленных явлений пластической деформации [1–9]. В работах [8, 9] показано, что ОМП являются важными механизмами пластической деформации сплавов на основе ванадия. При этом ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращения выступают в качестве механизма формирования мезополос <110> переориентации с большеугловыми (десять градусов) границами. Важной особенностью этих превращений является то, что единственной модой их деформации является однородная деформация превращения типа деформации Бейна при отсутствии для этой моды деформации каких-либо эффективных препятствий и одновременной возможности интенсивной релаксации таких состояний. Результатом активизации этого механизма в ванадиевых сплавах является сверхвысокая технологическая пластичность [8, 9].

В соответствии с [9] характер <110> переориентации в мезополосах ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений определяется изменением на 60° направления однородной деформации обратного превращения и типом ориентационных соотношений. Это приводит к формированию мезополос размерами (шириной) доли микрометра с большеугловыми (от ≈ 50 до 70°) границами. В настоящей работе представлены результаты исследования ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений на наномасштабном структурном уровне. Такие превращения обнаружены в ванадиевых сплавах V–4Cr–4Ti–0.013C–0.02O (далее V–4Cr–4Ti) и V–3Cr–7W–0.6Zr–0.11C–0.03O (вес.%) после испытаний на ударную вязкость.

Определение ударной вязкости проводили на образцах размерами 3×4×27 мм с V-образным концентратором напряжений в интервале температур от –186 до 150 °С на ударном копре VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. Структурные исследования проведены на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100 (200 кВ). Тонкие фольги получали методом ионной резки на сканирующем электронно-ионном микроскопе FEI Quanta 200 3D.

Нанообъемы ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений в окрестностях поверхностей (на расстояниях несколько микрометров) разрушения обнаружены после ударных испытаний как вблизи комнатной температуры, так и при температуре жидкого азота. Они наблюдаются в виде зон когерентного электронного рассеяния размерами несколько нанометров (рис. 1, а) как в мезополосах (50–60)° <110> переориентации, так и в их окрестности.

Электроннографический анализ показал, что в первом случае это нанообъекты с переориентациями, аналогичными большеугловым; во втором – с малоугловыми границами разориентации. Следовательно, указанные выше нанообъемы являются зонами ОЦК→ГПУ→ОЦК-превращений – наномасштабными зонами однородной деформации типа деформации Бейна.

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

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 7

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

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

Подписано к печати 18.07.2023. Выпуск в свет 20.07.2023. Заказ № 5532.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.11. Уч.-изд. л. 16.92. 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

