

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Сентябрь, 2023

№ 9 (790)

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 ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Дзядах С.М., Горн Д.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А. Численное моделирование униполярных барьерных фоточувствительных структур на основе МЛЭ n -HgCdTe.....5

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Демкин В.П., Мельничук С.В., Светлик М.В., Смаглий Л.В., Руденко Т.В., Зайцев В.А., Алифирова В.М., Гребенюк О.В. Физико-математическая модель отолитовых структур и численное моделирование динамики слоев отолитовых мембран животного при действии механического стимула.....17
- Гынгазов С.А., Васильев И.П., Болтуева В.А., Власов В.А. Синтез электрокорунда циркония в пучке быстрых электронов.....29
- Бакулин А.В., Каспарян С.О., Кулькова С.Е. Влияние состава и структуры интерфейсных слоев на адгезионные свойства границы раздела TiAl/Al₂O₃37
- Князева А.Г. Влияние изменения вязкости в окрестности температуры плавления на динамику синтеза покрытия47
- Коростелева Е.Н., Коржова В.В., Кривопапов В.П. Особенности структурообразования в порошковой системе Ti–Al–В в условиях реакционного спекания и синтеза59
- Седельникова М.Б., Майер В.В., Угодчикова А.В., Кашин А.Д., Толкачева Т.В., Химич М.А., Чебодаева В.В., Глухов И.А., Шаркеев Ю.П. Формирование структуры и фазового состава композитных аморфно-кристаллических микродуговых покрытий с частицами ZnO и волластонита68
- Чертова Н.В., Гриняев Ю.В. Поведение сдвиговых волн на границе раздела упругопластических тел с дислокациями.....76
- Калытка В.А., Коровкин М.В. Механизм нелинейной объемно-зарядовой поляризации в ионных диэлектриках86

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Кошоридзе С.И. Гомогенная и гетерогенная нуклеация микро- и нанопузырьков в перенасыщенных растворах.....95
- Чумаков Ю.А. Влияния сжимаемости газа на характеристики процесса горения и напряженно-деформированное состояние пористого керамического теплогенератора.....100

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Кузнецов В.С., Зиновьев М.М., Слюнько Е.С., Юдин Н.Н., Подзывалов С.Н., Кальсин А.Ю., Лысенко А.Б., Власов Д.В., Черемис М.А. Лучевая прочность тонкопленочного покрытия Nb₂O₅/SiO₂ для зеркал резонатора параметрического генератора света на основе монокристалла ZnGeP₂107
- Землянов А.А., Минина О.В. Пиковая интенсивность в нелинейном фокусе при самофокусировке мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе115

ПЕРСОНАЛИЯ

- К 85-летию профессора Владислава Гавриловича Багрова.....127

CONTENTS

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Voitsekhovskii A.V., Grigoriev D.V., Dzyadukh S.M., Gorn D.I., Mikhailov N.N., Dvoretzky S.A.** Numerical simulation of unipolar photo-sensitive barrier structures based on MBE n -HgCdTe..... 5

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Demkin V.P., Melnichuk S.V., Svetlik M.V., Smaglii L.V., Rudenko T.V., Zaitsev V.A., Alifirova V.M., Grebenuk O.V.** Physical and mathematical model of otolith organs and numerical simulation of the dynamics of animal's otolith membrane layers under the action of a mechanical stimulus..... 17
- Ghyngazov S.A., Vasil'ev I.P., Boltueva V.A., Vlasov V.A.** Synthesis of zirconia electrocorundum in a beam of fast electrons 29
- Bakulin A.V., Kasparyan S.O., Kulkova S.E.** Influence of composition and structure of interfacial layers on the adhesion properties of the TiAl/Al₂O₃ interface 37
- Knyazeva A.G.** Influence of viscosity changes in the vicinity of the melting temperature on the dynamics of coating synthesis 47
- Korosteleva E.N., Korzhova V.V., Krivopalov V.P.** Features of structure formation in the Ti–Al–B powder system under conditions of reaction sintering and synthesis 59
- Sedelnikova M.B., Mayer V.V., Ugodchikova A.V., Kashin A.D., Tolkacheva T.V., Khimich M.A., Chebodaeva V.V., Glukhov I.A., Sharkeev Yu.P.** Formation of the structure and phase composition of composite amorphous-crystalline micro-arc coatings with ZnO and wollastonite particles..... 68
- Chertova N.V., Grinyayev Y.V.** Behavior of shear waves at the interface of elastic-plastic bodies with dislocations 76
- Kalytka V.A., Korovkin M.V.** The mechanism of nonlinear space-charge polarization in ionic dielectrics 86

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Koshoridze S.I.** Homogeneous and heterogeneous nucleation of micro- and nanobubbles in supersaturated solutions 95
- Chumakov Y.A.** Influence of gas compressibility on the characteristics of the combustion process and the stress-strain state of a porous ceramic heat generator 100

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- 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.** Radiation strength of Nb₂O₅/SiO₂ thin-film coating for cavity mirrors of a parametric light generator based on a ZnGeP₂ single-crystal..... 107
- Zemlyanov A.A., Minina O.V.** Peak intensity in a nonlinear focus at self-focusing of high-power femtosecond laser pulses in air 115

PERSONALIA

- To the 85th anniversary of professor Vladislav Gavriilovich Bagrov** 127

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 539.216

DOI: 10.17223/00213411/66/9/1

**Численное моделирование униполярных барьерных
фоточувствительных структур на основе МЛЭ n -HgCdTe***

А.В. Войцеховский¹, Д.В. Григорьев¹, С.М. Дзядх¹, Д.И. Горн¹,
Н.Н. Михайлов^{1,2}, С.А. Дворецкий^{1,2}

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

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Представлены описание методики и результаты моделирования энергетической диаграммы, а также электрофизических и фотоэлектрических характеристик униполярных барьерных структур на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Проведено сопоставление проведенных ранее измерений вольт-амперных характеристик с результатами моделирования, которое демонстрирует, что предложенная модель адекватно описывает характеристики реальных экспериментальных образцов, выращенных методом МЛЭ.

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

Введение

Одним из перспективных направлений создания фоточувствительных приборов для среднего (MWIR) и дальнего (LWIR) инфракрасного (ИК) диапазонов, работающих при температурах, близких к комнатным, является применение униполярных барьерных структур на основе материала HgCdTe (КРТ) [1–3].

Для расчета рабочих характеристик полупроводникового прибора необходимо понимать закономерности токопереноса в гетероструктуре, составляющей основу данного прибора, при различных условиях (разных напряжениях смещения и температурах, при радиационных воздействиях и пр.) Поведение носителей заряда в гетероструктуре, в свою очередь, определяется их энергетическими свойствами, т.е. зонной диаграммой структуры. Моделирование полупроводниковых приборов в настоящее время осуществляется при помощи средств приборно-технологического моделирования полупроводниковых устройств (technology computer aided design (TCAD)), наиболее популярными и продвинутыми из которых являются Synopsys TCAD и Silvaco TCAD. Однако реалии настоящего времени делают недоступным для российских ученых легальное использование большинства коммерчески распространяемых TCAD, включая названные выше. В связи с этим встает необходимость развития программных средств с аналогичными функциями в нашей стране для целей проектирования, в частности приборов полупроводниковой фотоэлектроники.

Несмотря на то, что материал HgCdTe с точки зрения своих фундаментальных свойств хорошо подходит для применения в ИК-фотоэлектронике [4, 5], на практике реализация его фундаментальных преимуществ является трудной технологической задачей и зачастую дает результаты, существенно отличающиеся от идеальных [6]. Задача предиктивного моделирования электрофизических и фотоэлектрических характеристик приборов на основе HgCdTe является особенно актуальной. Конкретная реализация технологии выращивания HgCdTe (молекулярно-лучевая эпитаксия – МЛЭ, газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений – ГФЭМОС), а также технологического процесса изготовления приборной структуры из выращенной гетероструктуры оказывают существенное влияние на измеряемые параметры и характеристики экспериментальных образцов фоточувствительных структур. В частности, особенностью конструкции ИК-фотоприемных устройств является наличие боковых граней мезаструктур, посредством которых гетероструктура разделяется на отдельные фоточувствительные элементы. В этом случае фунда-

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

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.951

DOI: 10.17223/00213411/66/9/2

**Физико-математическая модель отолитовых структур
и численное моделирование динамики слоев отолитовых мембран
животного при действии механического стимула***

В.П. Демкин¹, С.В. Мельничук¹, М.В. Светлик¹, Л.В. Смаглий^{1,2},
Т.В. Руденко^{1,2}, В.А. Зайцев¹, В.М. Алифирова², О.В. Гребенюк^{1,2}

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

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

Предложена 3D-физико-математическая модель отолитовых органов вестибулярной системы на примере животного, крысы, с учетом их структурно-морфологических и анатомических особенностей. Проведен численный эксперимент по исследованию смещений слоев отолитовых мембран крысы под действием статического механического стимула, соответствующего вращениям вокруг главных осей головы (X , Y , Z). Показано, что угловые ускорения приводят к активации афферентных вестибулярных нервов не только полукружных каналов, но и отолитовых структур. При вращении головы вокруг главных осей наряду с активацией волосковых клеток полукружного канала активируются и клетки отолитовых органов, обеспечивая возбуждение соответствующих афферентных волокон и взаимодействие сигналов полукружных каналов и отолитовых структур. На основании расчета смещений гелевого и сетчатого слоев отолитовых мембран рассчитаны относительное число активированных клеток и их смещение, обуславливающее ионные токи трансдукции и изменение мембранного потенциала клеток. Результаты расчетов хорошо согласуются с многочисленными экспериментами по взаимодействию сигналов полукружных каналов и отолитовых органов. Предложенную 3D-модель и результаты расчетов рекомендовано использовать для разработки вестибулярного импланта.

Ключевые слова: физико-математическая модель, вестибулярный лабиринт, отолитовые структуры, отолитовая мембрана, волосковые клетки, морфологическая полярность, вестибулярная дисфункция, вестибулярный имплант.

Введение

Вестибулярная система человека является одной из самых сложных сенсорных биофизических систем, отвечающая за генерацию и передачу в мозг информации о положении тела в пространстве и об его движении [1]. Несмотря на многолетние исследования в данной области, физиологические и физические механизмы работы вестибулярного аппарата человека недостаточно изучены, поскольку его диагностика *in vivo* очень сложна. В таких случаях эффективным методом является физико-математическое моделирование и последующее сравнение результатов расчетов с экспериментальными результатами, полученными на лабораторных животных. Почти идентичное строение сенсорных эндоорганов, нейронных путей у разных позвоночных дает возможность делать общие выводы о физических свойствах вестибулярных анализаторов и вычислительных возможностях нейронных компонентов вестибулярных путей человека на основе экспериментов с животными, например, с крысами [1, 2].

Периферический отдел вестибулярной системы позвоночных представлен тремя взаимно перпендикулярными полукружными каналами 1 и двумя перепончатыми мешочками 2, 3 во внутреннем ухе (рис. 1), которые стимулируются линейным или угловым ускорением, обеспечивая восприятие положения или движения головы.

Два отолитовых сенсорных органа, утрикулярная и саккулярная макулы 5, опосредуют восприятие линейного ускорения, в то время как кристы 4 трех полукружных каналов обнаруживают угловое ускорение. Каждый вестибулярный сенсорный эпителий содержит механосенсорные волосковые клетки, которые действуют как первичные преобразователи для вестибулярной передачи сигналов в головной мозг [2].

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

Синтез электрокорунда циркония в пучке быстрых электронов*

С.А. Гынгазов¹, И.П. Васильев¹, В.А. Болтуева¹, В.А. Власов¹

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Проведен синтез электрокорунда циркония в поле мощного пучка быстрых электронов (2 МэВ) за короткое время (несколько секунд). В качестве исходного сырья использована порошковая смесь электрокорунда М20 и ультрадисперсного порошка диоксида циркония в пропорции 80% Al_2O_3 – 20% ZrO_2 . Порошковая смесь насыпной плотности при атмосферных условиях подвергалась кратковременной обработке электронным пучком мощностью 28 кВт. Кюветы с порошковыми образцами перемещались в плоскости падения пучка со скоростью 1 см/с. За время прохождения под облучением исходный порошковый продукт подвергался плавлению и вспениванию. Одновременно зерна корунда в результате рекристаллизации приобретали преимущественно кубическую форму. По данным сканирующей электронной микроскопии между зернами корунда равномерно распределены частицы диоксида циркония. Результаты свидетельствуют о перспективности использования электронной обработки для синтеза сложнооксидных соединений.

Ключевые слова: электрокорунд циркония, быстрые электроны, синтез.

Введение

Оксидная керамика является самой распространенной в природе. Ее прекрасные теплозащитные, механические свойства обусловили широкое применение оксидов в качестве конструкционных материалов. В то же время ее диэлектрические и полупроводниковые свойства позволят создавать широкий спектр функциональных материалов. Оксиды для использования в технике в большом количестве добывают в виде природных ископаемых. Для создания особо чистых оксидных материалов используют различные методы: химические [1, 2], плазмохимический [3, 4], лазерного испарения [5] и др. [6, 7]. Самым распространенным оксидом считается оксид алюминия, который в природе чаще всего встречается в виде корунда. Исследования по его использованию не прекращаются и в наше время. Так, в [8] рассматриваются новые уникальные свойства наночастиц корунда. Продолжаются исследования по созданию новых огнеупоров на основе системы оксида алюминия [9–11]. Корунд находит применение в биомедицине [12]. Также корунд давно и широко используют в качестве абразива. Эксплуатационные свойства корундовых абразивов значительно улучшаются при добавлении в корунд диоксида циркония [13]. Проводятся работы по созданию на основе корунда макропористой керамики [14].

Большие перспективы имеет оксид алюминия при получении новых составов перовскитов [15, 16] и теплозащитных керамик [17, 18] и покрытий [19] на их основе. Особенностью всех керамических технологий, в которых применяется оксид алюминия и другие оксиды, является использование высоких температур и больших времен термической обработки. Так, например, циркониевый электрокорунд получают при длительной плавке глинозема с присадками из оксида циркония и бадделеитового концентрата в электродуговой печи. Для сокращения энергетических затрат на производство сложнооксидных соединений необходимо разрабатывать новые нетрадиционные методы получения таких материалов. В последнее время особое внимание уделяется использованию для реализации технологий ускоренного синтеза оксидных соединений высокоинтенсивных пучков быстрых электронов. Перспективность их применения подтверждена в исследованиях по синтезу ферритов в электронном пучке [20–25]. В этих работах использовали температуры радиационного нагрева реакционных смесей, не превышающие характерные значения температуры спекания керамик из них. Однако время синтеза по-прежнему оставалось длительным. Новые возможности ускорения синтеза сложнооксидных соединений открываются при использовании скоростного нагрева реакционных смесей пучками быстрых электронов большой мощности, когда за время электронной обработки температура компонентов реакционной смеси достигает температуры плавления хотя бы одного из компонентов. Так, на примере люминофоров ($\text{MgF}_2\text{:W}$, YAG:Ce) в работах [26–28] показано, что такой подход является весьма перспективным. Хотя данными исследователями получены весьма обнадеживающие результаты, многие вопросы по механизмам протекания синтеза в таких условиях

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-00014).

Влияние состава и структуры интерфейсных слоев на адгезионные свойства границы раздела TiAl/Al₂O₃*

А.В. Бакулин¹, С.О. Каспарян¹, С.Е. Кулькова¹

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

Методом проекционных присоединенных волн в рамках теории функционала электронной плотности проведено систематическое изучение химической связи на границе раздела γ -TiAl/ α -Al₂O₃(0001) с промежуточными металлическими, оксидными и нитридными слоями. Рассчитаны значения энергии адгезии на интерфейсах в зависимости от плоскости разрыва. Показано, что в случае металлических слоев адгезия существенно понижается на границе раздела TiAl/Me, однако остается высокой на интерфейсе Me/ α -Al₂O₃(0001)_O, что обусловлено ионным вкладом в механизм химической связи. Результаты расчетов указывают, что оксиды примесей состава Me₂O₃ и MeO₃ существенно влияют на адгезию, причем разрушение будет иметь место в оксиде примеси. Напротив, адгезия на интерфейсе TiN/Al₂O₃ достигает высоких значений, однако на TiAl/TiN интерфейсе понижается до 5.65 Дж/м².

Ключевые слова: граница раздела, адгезия, химическая связь, электронная структура, теория функционала электронной плотности.

Введение

Сплавы на основе титана и алюминия являются очень перспективными материалами для высокотемпературных приложений в авиационной и космической промышленности благодаря низкой плотности, высокой термостойкости, высокому сопротивлению ползучести и другим характеристикам [1, 2]. Быстрый рост оксидной шкалы на поверхности Ti–Al-сплавов ограничивает их использование при температурах выше 800 °C [3]. Известно, что на поверхности Ti–Al-сплавов наблюдается конкуренция между ростом оксидов титана и алюминия, что обусловлено подобной энергетикой образования оксидов [4–6]. В работе [5] было установлено, что на начальной стадии при 650 °C на поверхности γ -TiAl(111) формируются тонкие слои Al₂O₃ и лишь в дальнейшем наблюдается образование оксидов титана [6]. На заключительном этапе одновременно происходит внутреннее и внешнее окисление, причем внешняя оксидная пленка преимущественно образована TiO₂ со структурой рутила [5, 6]. Для понимания механизмов окисления Ti–Al-сплавов изучалась адсорбция кислорода на их низкоиндексных поверхностях с использованием *ab initio* методов [7–11]. Прочность и стабильность интерфейсов Ti–Al/оксид рассматривалась в работах [12–17]. Например, в [12, 13] изучались границы раздела TiAl(110)/TiO₂(110)_O в зависимости от окончания поверхности сплава алюминием или титаном. В работе [13] проводилось изучение влияния примесей на адгезионные свойства TiAl(110)_{Ti}/TiO₂(110)_O. Было установлено, что Y, Nb и Pd являются наиболее подходящими элементами для усиления химической связи между оксидом и сплавом. Характеристики связи на интерфейсе TiAl(111)/Al₂O₃(0001) изучались в [14]. Было показано, что адгезия на интерфейсе между сплавом и оксидом с Al-окончанием значительно ниже (1.05 Дж/м²), чем с O-окончанием (4.04 Дж/м²). Влияние переходных металлов VB и VIB групп на адгезионные свойства γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al с Al₂O₃ было недавно изучено в [15]. Авторы работы [15] установили, что Nb повышает адгезию на интерфейсе TiAl/Al₂O₃. Значения адгезии, приведенные в [15] для идеальных границ раздела Ti–Al/Al₂O₃ с O-окончанием оксида (–0.16 Дж/м² (Ti₃Al) и 3.68 Дж/м² (TiAl)) значительно ниже, чем полученные 11.02 Дж/м² (Ti₃Al/Al₂O₃(0001)_O) и 10.43 Дж/м² (TiAl/Al₂O₃(0001)_O) в работах [16, 17]. Изучение влияния примесей на прочность интерфейса Ti₃Al(0001)/Al₂O₃(0001)_O в [16] показало, что примеси переходных металлов IVB–VIB групп понижают адгезию в меньшей степени, чем другие переходные металлы, если они замещают титан в интерфейсном слое, и, напротив, они незначительно повышают адгезию, если замещают алюминий. Однако ряд примесей (Nb, Mo, Si) способствует O–Al-взаимодействию, что может приводить к повышению коррозионной стойкости.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2022-0001. Численные расчеты проводились на суперкомпьютере «СКИФ Cyberia» в Томском государственном университете.

Влияние изменения вязкости в окрестности температуры плавления на динамику синтеза покрытия*

А.Г. Князева¹

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

Представлена связанная модель эволюции состава и сопутствующих напряжений в порошковом слое при воздействии подвижного источника тепла. Модель учитывает вязкоупругие напряжения и деформации, обусловленные изменением температуры и состава. Теплоемкость и вязкость зависят от доли жидкой фазы. Проанализированы физические масштабы и безразмерные комплексы. Продемонстрированы качественные особенности в поведении температуры и напряжений в интервале температур плавления вследствие изменения вязкости с долей жидкой фазы и формированием продукта химической реакции.

Ключевые слова: подвижный источник тепла, плавление, вязкоупругие напряжения, химическая реакция.

Введение

В 3D-технологиях, моделированию которых посвящается огромное число публикаций, в едином цикле смесь порошков претерпевает сложные изменения. При плавлении в области действия луча лазера или электронного луча порошок (или его легкоплавкая часть) переходит из твердого состояния в жидкое; затем при остывании имеет место переход в твердую фазу и кристаллизация. Весь процесс сопровождается разнообразными физическими и химическими явлениями. С такими преобразованиями связаны и изменения в реологическом поведении. Если порошок в реологическом отношении подобен вязкой жидкости, то затвердевший слой относится к упругим или упруго-пластичным материалам. При математическом моделировании сопутствующих явлений возникает проблема выбора или построения подходящей модели, которая адекватно описывала бы поведение материала как в твердой и жидкой фазах, так и в двухфазной области. С этим связано разнообразие подходов к моделированию. В многочисленных публикациях анализируются чисто теплофизические модели для расчета температурных полей при различных вариантах представления источника тепла [1, 2]; исследуется поведение мелких частиц в ванне расплава [3]; описывается плавление порошка и течение расплава в нерасплавленном порошке, в том числе с использованием теории фильтрации [4]; анализируются варианты расчета остаточных напряжений [5, 6] и т.д. Несмотря на то, что каждый из подходов позволяет получить интересные результаты и изучить ряд явлений, процесс создания нового материала в динамике и сопутствующие ему явления оказываются недостаточно изученными.

В настоящей работе представлена связанная модель обработки движущимся источником тепла слоя порошка, расположенного на подложке, в предположении, что превращение материала «порошок – жидкость – твердое тело» характеризуется изменением теплоемкости и вязкоупругих свойств. Цель работы состоит в исследовании особенностей в поведении температуры и напряжений в интервале температур плавления в процессе синтеза покрытия.

Постановка задачи

В [7] кратко описана модель термической обработки тонкого слоя порошка, расположенного на подложке, подвижным источником энергии. В качестве основы для построения модели использована модель типа Максвелла, которая допускает переход как к жидкости, так и к упругому телу при изменении коэффициента сдвиговой вязкости [8]. В рамках этой модели справедливы соотношения между компонентами тензоров напряжений и деформаций вида

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dt} + \frac{\mu}{\kappa} \sigma_{ij} = 2\mu \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} + \delta_{ij} \left[\frac{d}{dt} (\lambda \varepsilon_{kk} - K w) + \frac{\mu}{\kappa} K (\varepsilon_{kk} - w) \right]. \quad (1)$$

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

Особенности структурообразования в порошковой системе Ti–Al–B в условиях реакционного спекания и синтеза*

Е.Н. Коростелева¹, В.В. Коржова¹, В.П. Кривопапов¹

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

Рассмотрены структура и фазовый состав порошковых материалов системы Ti–Al–B, формируемый в процессе вакуумного спекания и синтеза в зависимости от комбинирования компонентов в виде элементарных порошков (Ti, Al и B) и с использованием готового соединения диборида титана TiB₂. Пропорции компонентов были рассчитаны таким образом, чтобы количества взаимодействующих элементов было достаточно для формирования двухфазного состава Ti₃Al+TiB₂. Показано, что при спекании и самораспространяющемся высокотемпературном синтезе смеси из элементарных порошков преимущественно формируется алюминид Ti₃Al и моноборид TiB. При спекании смеси Ti+Al+TiB₂ диборид сохраняется, но отмечено присутствие TiB как результат взаимодействия диборида с титаном. Для всех вариантов смеси наблюдается объемный рост при температуре спекания 1000 °С, который сменяется на усадку при 1200 °С для порошковой смеси Ti+Al+B и сохраняется при повышении температуры для порошковой смеси Ti+Al+TiB₂.

Ключевые слова: алюминиды титана, бориды титана, реакционное спекание, пористость, структура, фазовый состав.

Введение

Развитие новых технологических процессов, в том числе связанных с аддитивным производством, требует расширения ресурсной базы, основанной на применении различных материалов. Кроме традиционных металлов и сплавов большой интерес вызывают сложные многокомпонентные композиционные материалы на основе титана [1–4]. Наиболее востребованной группой таких композитов являются металломатричные композиты с тугоплавкими включениями. Их привлекательные физико-химические и механические свойства известны уже давно и широко исследуются. Среди твердых тугоплавких включений большую популярность получили карбиды, силициды и бориды титана, поскольку они востребованы в самых разных отраслях промышленного производства, начиная от медицинского материаловедения, химического производства и заканчивая транспортным машиностроением [5–9]. Кроме тугоплавких керамических соединений титана также представляют большой интерес его интерметаллидные соединения с алюминием (TiAl, Ti₃Al) из-за высоких функциональных свойств [10–12]. Совокупность уникальных свойств, демонстрируемых алюминидом титана, включает в себя высокую температуру плавления, низкую плотность, высокие упругие модули, стойкость к окислению, высокие коэффициенты отношения прочность/плотность и жаропрочность.

Несмотря на активное продвижение титановых сплавов и композитов на его основе в качестве материальных ресурсов для передовых технологических процессов, существует целый ряд научных проблем, ограничивающих возможный потенциал их использования. В частности, остается открытым вопрос корреляции между распределением элементов при выбранном соотношении компонентов, их процедурой смешивания и условиями термической обработки. Этот вопрос приобретает еще большее значение в условиях нестационарных воздействий с высоким градиентом температур, неоднородностью температурных полей и локализованных областей контактного плавления, которые характерны, например, при селективном лазерном сплавлении или спекании (SLM/SLS). В этом случае важно понимание, каким образом может протекать фазообразование и формирование финишной структуры на основе тех реакционно-диффузионных процессов, которые реализуются при нагреве с учетом локальных контактных межчастичных областей. Поскольку все это носит многофакторный характер, то весьма затруднительно предсказать точный структурно-фазовый состав получаемого композита для конкретного случая. К сожалению, в литературе представлены разрозненные точечные сведения о металломатричных композитах различных систем, которые касаются конкретных стехиометрических составов и условий синтеза. Исследований, систематизирующих описание поведения сложных многокомпонентных порошковых систем с взаимодействующими элементами, пока еще недостаточно.

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0005.

Формирование структуры и фазового состава композитных аморфно-кристаллических микродуговых покрытий с частицами ZnO и волластонита*

М.Б. Седельникова¹, В.В. Майер², А.В. Угодчикова¹, А.Д. Кашин¹, Т.В. Толкачева¹,
М.А. Химич¹, В.В. Чебодаева¹, И.А. Глухов¹, Ю.П. Шаркеев¹

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

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

Рассмотрены закономерности формирования композитных аморфно-кристаллических покрытий с частицами оксида цинка и волластонита методом микродугового оксидирования (МДО) на металлических подложках из сплава Mg – 0.8 мас.% Са. Установлено влияние напряжения процесса МДО на структурно-морфологические свойства, фазовый и элементный состав покрытий. В результате плазмохимических реакций взаимодействия компонентов электролита и магниевой подложки при варьировании напряжения процесса МДО в диапазоне 350–500 В формируется пористое аморфно-кристаллическое покрытие толщиной 20–90 мкм с частицами оксида цинка в объеме и волластонита на поверхности. Содержание Zn в покрытиях достигает 8 ат.%. Выявлено наличие в покрытиях следующих кристаллических фаз: волластонита, оксида цинка, форстерита, оксида магния. Сформированные методом МДО композитные покрытия, содержащие силикаты кальция и магния, а также частицы оксида цинка, перспективны для применения в клинической имплантологии как биоактивные покрытия, обеспечивающие одновременно интенсивную остеоинтеграцию и антибактериальный эффект.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, композитное покрытие, магниевый сплав, аморфно-кристаллический слой, частицы ZnO, частицы волластонита, морфология поверхности.

Введение

В настоящее время в клинической имплантологии произошло значительное смещение интересов от использования биоинертных коррозионностойких металлов, таких как аустенитные нержавеющие стали, сплавы Co–Cr–Mo или титановые сплавы, к применению биоразлагаемых металлов и сплавов, таких как сплавы магния, цинка и железа [1–3]. Ученые уделяют пристальное внимание биоматериалам, которые могут служить в качестве временной конструкции, а затем постепенно растворяться в организме, замещаясь натуральной тканью [2]. Таким образом, разлагаемые материалы представляют собой биоматериалы третьего поколения [4].

Биоразлагаемые магниевые сплавы уже сейчас активно используются в биомедицинских приложениях. Кроме способности растворяться в организме человека, не вызывая воспалительных процессов, для них характерны такие свойства, как низкая плотность (1.7 г/см^3), близкая к плотности человеческой кости, и низкий модуль упругости (около 45 ГПа) [5–7].

Для замедления скорости биорезорбции магниевых имплантатов применяют различные методы. Это легирование элементами, биосовместимыми с организмом человека [8], измельчение зерна с использованием метода интенсивной пластической деформации [9], а также модификация поверхности путем нанесения биосовместимого труднорастворимого покрытия [10].

Наиболее простым и технологичным методом формирования покрытий на поверхности металлов вентильной группы является метод микродугового оксидирования (МДО), или плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) [11]. Одним из достоинств данного метода является возможность варьировать состав электролита в широком диапазоне, что позволяет создавать покрытия с особыми функциональными свойствами [12]. В настоящее время большой проблемой в имплантологии являются бактериальные инфекции, связанные с образованием биопленки. Данный процесс включает бактериальную адгезию, образование микроколоний, образование, созревание биопленки [13]. Результаты многих исследователей показывают, что цинксодержащие материалы оказывают ингибирующее воздействие на процессы образования биопленки [14, 15].

Цель представленной работы – формирование композитных покрытий, содержащих частицы волластонита и оксида цинка, а также исследование влияния напряжения процесса микродугового оксидирования на морфологию, структуру, фазовый и элементный составы покрытий.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, номер FWRW-2021-0007. Исследования выполнены на экспериментальном оборудовании в ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН (Томск, Россия).

Поведение сдвиговых волн на границе раздела упругопластических тел с дислокациями*

Н.В. Чертова¹, Ю.В. Гриняев¹

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

Рассматривается задача прохождения плоской гармонической волны через границу раздела упругопластических тел с дислокациями. Для описания изучаемых тел используется континуальная модель, полученная в рамках лагранжева формализма с применением теории калибровочных полей. Согласно данной модели, волна сдвига в упругопластическом теле с дислокациями распространяется в виде связанных волн поперечных смещений и сдвиговых компонент тензора пластической дисторсии. С помощью асимптотического метода медленно меняющейся амплитуды и дисперсионных соотношений рассматриваемой волны находятся аналитические выражения для коэффициентов отражения и преломления при различных граничных условиях в случае нормального падения первичной волны. Рассчитываются частотные зависимости коэффициентов Френеля на границе раздела упругопластических тел при условиях их идеального контакта, скольжения, вязкого трения и неидеального контакта. Анализируется влияние упругих параметров модели и параметров дислокационного континуума на процессы прохождения волн сдвига через границы раздела упругопластических тел при указанных граничных условиях.

Ключевые слова: упругопластическое тело, дислокации, континуальная модель, граничные условия, коэффициенты отражения и преломления.

Введение

Волновые процессы в той или иной мере присущи всем без исключения объектам материального мира. С волнами мы сталкиваемся в повседневной жизни и при изучении физики многих явлений [1–3]. Волны, распространяющиеся в различных средах, отличаются друг от друга. В жидкостях и газах возмущения распространяются преимущественно в направлении, вдоль которого происходит колебание частиц, т.е. волны в жидкостях и газах являются продольными. Твердые тела обладают сдвиговой упругостью, поэтому в них, наряду с продольными волнами, распространяются поперечные колебания. В средах с внутренней микроструктурой или дефектами, математические модели которых кроме векторов смещений содержат дополнительные степени свободы, установлена возможность существования других типов волн [4–8].

Для реальных материалов и тел характерно наличие границ раздела, которые существенным образом влияют на их физико-механические свойства и эксплуатационные возможности [9, 10]. Особенности распространения волн при наличии границ раздела являются предметом теоретических и экспериментальных исследований на протяжении многих лет [1, 2, 11]. В последние десятилетия при аналитическом и численном решении этой задачи, наряду с традиционными моделями сред, рассматриваются модели сред с внутренними степенями свободы, например, среды Коссера [5]. В рамках континуальных моделей упругопластического тела с дислокациями [7, 8] задача прохождения волн через границу раздела не рассматривалась.

В работе исследуются закономерности распространения сдвиговых волн через границу раздела упругопластических сред с дислокациями, динамика которых определяет один из известных механизмов пластической деформации. Для описания указанных сред используется математическая модель, полученная на основе лагранжиана калибровочной теории дислокаций при условии пластической несжимаемости [8]. Из условия стационарности интеграла действия определяются динамические уравнения Эйлера – Лагранжа и находятся дисперсионные соотношения среды. Как следует из полученных законов дисперсии, продольные волны в упругопластической среде с дислокациями распространяются в виде связанных волн продольных смещений и диагональных компонент тензора пластической дисторсии или пластических удлинений. Поперечные волны представляют совокупность нормальных колебаний поперечных смещений и сдвиговых компонент тензора пластической дисторсии. Для сдвиговых волн в случае нормального падения первичной волны находятся коэффициенты отражения и преломления при граничных условиях идеального контакта, скольжения, вязкого трения и неидеального контакта в рамках асимптотического метода

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0002.

Механизм нелинейной объемно-зарядовой поляризации в ионных диэлектриках

В.А. Калытка¹, М.В. Коровкин^{2,3}

¹ Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

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

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

Методами квазиклассической кинетической теории диэлектрической релаксации исследуется механизм нелинейной объемно-зарядовой поляризации в диэлектриках с ионно-молекулярными химическими связями типа слоистых кристаллов (слюды, кристаллогидраты; перовскиты; вермикулиты и др.) в широком теоретическом диапазоне температур (1–1550 К) и полей (0.1–1000 МВ/м). На основной частоте переменного поляризующего поля с помощью нелинейных выражений для комплексной диэлектрической проницаемости построены важные для теории формулы для дебаевского радиуса экранирования пространственно-неоднородного электрического поля, индуцированного в диэлектрике в процессе его поляризации. Установлено, что размерные эффекты в ионно-молекулярных диэлектриках (в зависимости от степени сложности кристаллической решетки) проявляются в существенном влиянии толщины диэлектрика, параметров релаксаторов (равновесная концентрация, энергия активации (высота потенциального барьера), линейная частота собственных колебаний в потенциальной яме, ширина потенциального барьера и др.) и температуры на времена релаксации (диффузионное и максвелловское) и их отношение и на особенности механизма диэлектрической релаксации. Построено трансцендентное уравнение для расчета критической температуры, разделяющей области (зоны) диффузии и максвелловской релаксации.

Ключевые слова: ионные диэлектрики, квазиклассическая кинетическая теория диэлектрической релаксации, нелинейная объемно-зарядовая поляризация, комплексная диэлектрическая проницаемость, статическая диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

Введение

Наиболее актуальными и перспективными в области современного электро- и радиотехнического материаловедения являются комплексные (теоретические и экспериментальные) исследования, направленные на разработку и усовершенствование научно обоснованных алгоритмов для компьютерного анализа и прогнозирования нелинейных свойств гетерогенных композитных материалов (МПП-, МДП-структур и др.), применяемых в качестве быстродействующих функциональных элементов для микросхем технологических установок и систем (в том числе контрольно-измерительной, диагностической и электронно-вычислительной техники), работающих в условиях реального промышленного производства в переменных режимах внешних силовых нагрузок [1–7].

В данной работе в качестве объекта исследования выбраны такие известные в инженерии и технике материалы, как диэлектрики с ионно-молекулярными химическими связями (керамика; слоистые кристаллы (слюды, кристаллогидраты); перовскиты; вермикулиты и др.), характеризующиеся высокой протонной проводимостью в экспериментальном диапазоне температур (50–100 К) в области слабых полей (0.1–1 МВ/м) и высокой ионной проводимостью в экспериментальном диапазоне температур (150–550 К) в области сильных полей (10–1000 МВ/м) [8–11].

Цель данной работы состоит в разработке и научном обосновании теоретических схем исследования различных проявлений нелинейной объемно-зарядовой поляризации в ионно-молекулярных диэлектриках в широком теоретическом диапазоне температур (1–1550 К) и параметров полей (0.1–1000 МВ/м), для определения наиболее эффективных направлений практического использования этих материалов в современной промышленности. Теоретическая методология будет строиться на основных положениях нелинейной квазиклассической теории [12–15].

1. Квазиклассическая модель кинетических явлений в диэлектриках

Теоретические исследования частотно-температурных спектров комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) ионно-молекулярных диэлектриков проводятся с использованием методов нелинейной кинетической теории релаксационной поляризации и проводимости [12–15]

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 29.19.22

DOI: 10.17223/00213411/66/9/10

**Гомогенная и гетерогенная нуклеация микро- и нанопузырьков
в перенасыщенных растворах**С.И. Кошоридзе¹¹ *Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Развита классическая теория нуклеации объемных и поверхностных микро- и нанопузырьков на случай большой концентрации образовавшихся зародышей газовой фазы. Получена система уравнений, позволяющая посчитать радиус и концентрацию критических зародышей при заданном перенасыщении и контактном угле.

Ключевые слова: гомогенная нуклеация, гетерогенная нуклеация, закон Генри, критический зародыш.

В последнее время существенно вырос научный и прикладной интерес к поверхностным и объемным микро- и нанопузырям, что связано с их широким применением в различных областях технологии [1]. Однако многие научно-технические вопросы, касающиеся данных объектов, до сих пор остаются открытыми. Например, предсказать размеры и концентрацию как объемных (гетерогенная нуклеация), так и поверхностных (гомогенная нуклеация) пузырей в перенасыщенных растворах очень сложно [2, 3]. Обычно для оценки используется классическая теория зародышеобразования (КТЗ) [4, 5]. Однако, как отмечалось автором ранее [6], КТЗ справедлива только тогда, когда образовывается настолько мало пузырьков, что концентрация растворенного вещества после нуклеации практически не меняется.

В настоящей работе мы снимем ограничение на малость концентрации зародышей новой фазы и найдем связь между размером, энергией образования и концентрацией образовавшихся пузырей. Будут рассмотрены случаи как гомогенной, так и гетерогенной нуклеации микро- и нанопузырей.

Рассмотрим воду, в которой растворено некоторое вещество (компонента) с мольной концентрацией c (моль/м³). Пусть в воде давление однородно (пренебрегаем гравитационными эффектами) и равно p_l . Связь между концентрацией c и парциальным давлением p этого же вещества, находящегося в газовой фазе, контактирующей с водой, устанавливает закон Генри:

$$c = k_H p, \quad (1)$$

где k_H – константа Генри. Величина

$$c_s = k_H p_l \quad (2)$$

называется концентрацией насыщения. При $c > c_s$ раствор перенасыщенный и в нем могут образовываться пузырьки с растворенной компонентой в газовой фазе внутри.

Согласно КТЗ, радиус R_c критического пузырька должен удовлетворять условию (γ – поверхностное натяжение воды)

$$\frac{c}{k_H} = \frac{2\gamma}{R_c} + p_l. \quad (3)$$

Критический пузырек находится как в механическом, так и в диффузионном равновесии с окружающей средой. Согласно (3), зная концентрацию c , константу Генри k_H , поверхностное натяжение γ и давление в воде p_l , легко найти радиус критического зародыша R_c . Как было отмечено во введении, формула (3) справедлива только тогда, когда в растворе образовывается настолько мало пузырьков, что мольная концентрация c остается практически неизменной. Однако если в

Влияния сжимаемости газа на характеристики процесса горения и напряженно-деформированное состояние пористого керамического теплогенератора*

Ю.А. Чумаков¹

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

Проведено теоретическое исследование модели сжигания газа в цилиндрическом пористом теплогенераторе с учетом потерь тепла как внутри тела, так и с внешней поверхности. Рассматривается двухтемпературная модель в нестационарной постановке. Выявлено, что учет сжимаемости газа не сказывается на температуре твердой фазы и напряженно-деформированном состоянии горелочной установки на стадии зажигания, но существенно влияет на температуру и концентрацию реагента после инициирования процесса. Показано, что в случае выхода процесса горения на стационарный режим практически всегда реализуется линейное распределение профиля температуры каркаса. Представлено аналитическое решение упрощенной задачи, которое можно использовать для инженерных оценок при проектировании пористых цилиндрических радиационных горелок.

Ключевые слова: пористая керамика, сжимаемость газа, фильтрационное горение.

Введение

Одной из проблем, которая возникает при разработке пористых керамических радиационных горелок, является разрушение рабочего тела под действием тепловых нагрузок. При повышении температуры в теле одновременно протекают обусловленные физическими свойствами материала процессы теплового расширения и сжатия. Это приводит к взаимному ограничению свободных противоположных по знаку деформаций, и в теле возникают нестационарные напряжения, которые могут превысить предел прочности пористого материала [1]. Знание величины и характера действия тепловых напряжений необходимо для всестороннего анализа прочности конструкции. Тепловые напряжения сами по себе могут вызвать появление трещин и разрушение конструкции из материала с повышенной хрупкостью. Некоторые материалы, используемые для изготовления пористых горелок, при быстром возникновении напряжений, обусловленном действием резко нестационарного температурного поля, становятся хрупкими и не выдерживают теплового удара. Повторное действие тепловых напряжений приводит к термоусталостному разрушению элементов конструкции [2]. Действие тепловых напряжений может вызвать значительную пластическую деформацию, ведущую к полному или прогрессирующему разрушению элементов горелочного устройства.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) рабочего тела горелочного устройства и режимов сжигания газа в пористой среде при варьировании технологических параметров в широких пределах весьма трудно осуществить экспериментально, поэтому прибегают к математическому моделированию [3, 4]. Для описания структуры пористых тел используются, как правило, упрощенные модели [5, 6], в основе которых лежит либо представление о порах тела как о капиллярных цилиндрических трубах [5], либо пористое тело рассматривается как система сферических частиц, которые могут быть и пустотелыми [6]. Эти шары могут быть уложены различным образом. Известно, что наибольшая пористость получается при использовании одинаковых по размеру сферических зерен [7]. В качестве простейших форм укладки можно привести кубическую или ромбическую. Однако в реальных материалах практически всегда имеются зерна различных размеров, что заметно снижает пористость и размер пор.

При изучении стационарных и нестационарных моделей горения газа в пористой среде (также называемом фильтрационным горением) в конечных областях во многих работах [5–9] пренебрегают сжимаемостью газа, а граничные условия оставляют теми же, что и для бесконечной области, т.е. взаимодействие с окружающей горелку средой и с теплообменником не анализируется. В настоящей работе проводится теоретическое исследование влияния сжимаемости газа на режимы работы и НДС пористого тела керамической горелки на основе модели [4] в нестационарной постановке и

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 539.231

DOI: 10.17223/00213411/66/9/12

Лучевая прочность 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

Изготовлены диэлектрические зеркала с оксидным покрытием для параметрического генератора света (ПГС) на основе монокристалла ZnGeP_2 . Определены пороговые значения лазерно-индуцированного пробоя диэлектрических зеркал, изготовленных для однопроходного (№ 1) и многопроходного (№ 2) резонаторов ((3.5 ± 0.1) и (3.9 ± 0.1) Дж/см² соответственно). На основании полученных данных проведена апробация зеркал в системе ПГС, основанной на монокристалле ZnGeP_2 . Максимальное значение КПД генерации, достигнутое в эксперименте, составило ~ 54% при использовании зеркала № 1 и 50% при использовании зеркала № 2. При этом средняя мощность генерируемого излучения ПГС составила 7.7 и 3.7 Вт при использовании зеркала № 1 и зеркала № 2 соответственно. Показана возможность создания диэлектрического зеркала с высокой лучевой прочностью, работающего в диапазоне 3.5–5 мкм на сапфировой подложке.

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

Введение

Обычно для оптимальной работы параметрического генератора света (ПГС) требуется тщательный подбор характеристик оптического резонатора. Одним из способов создания зеркал резонатора с необходимыми параметрами является напыление интерференционных оптических покрытий на элементы, используемые в качестве входного и выходного зеркала резонатора. Известными на сегодняшний день методами напыления можно получать как простые пленки, состоящие из одного слоя, так и сложные пленки, в которых несколько слоев из разных материалов чередуются (обычно подбирается несколько материалов с низким и высоким показателями преломления), создавая тем самым сложную интерференционную систему. Подбирая определенные материалы и их толщину, можно получить эффективные просветляющие (антиотражающие), зеркальные, свето- и спектроделительные, фильтрующие и поляризующие покрытия (с некоторыми из них вы можете ознакомиться более подробно в [1]).

Стоит отметить, что во многих ситуациях большую роль играет порог лазерно-индуцированного пробоя (ПЛИП) и прочность покрытий. На два этих параметра значительно влияет выбираемый метод нанесения оптического покрытия. По своей природе все существующие на сегодня методы можно условно разделить на физические и химические. Химические методы основаны на процессах осаждения газообразных или жидких прекурсоров, в ходе которых на поверхности оптического элемента формируется пленка. В свою очередь, за основу физических методов берется перенос атомов материала будущей пленки из источника (мишени) на подложку с последующей конденсацией и формированием покрытия [2].

В данной работе мы не будем рассказывать о технологиях химического осаждения пленок (CVD), однако стоит упомянуть несколько ключевых особенностей. Существенным ограничением химического осаждения является отклонение состава пленки от состава мишени, что связано с

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

Пиковая интенсивность в нелинейном фокусе при самофокусировке мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе

А.А. Землянов¹, О.В. Минина¹

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

Рассмотрен процесс формирования нелинейного фокуса при самофокусировке мощного ультракороткого лазерного излучения в оптической среде. Детально изучены его особенности при распространении мощного фемтосекундного лазерного импульса в воздухе. Особое внимание уделено участку от точки начала остановки коллапса z_c до нелинейного фокуса z_f , на котором происходит остановка коллапса интенсивности. Показано, что на этом интервале пиковая интенсивность излучения увеличивается в 2 раза. В приближении нелинейного уравнения Шредингера установлен критерий остановки коллапса интенсивности. Он позволяет учитывать особенности нелинейной активности различных оптических сред при распространении мощного ультракороткого лазерного излучения в оптической среде.

Ключевые слова: фемтосекундные лазерные импульсы, самофокусировка, коллапс интенсивности, дифракция, плазменная нелинейность, поглощение, эффективная диэлектрическая проницаемость, дифракционный луч, дифракционно-лучевая трубка.

Введение

Формирование нелинейного фокуса при самофокусировке мощного лазерного излучения как в воздухе, так и в другой оптической среде происходит за счет действия нелинейного оптического эффекта Керра, когда пучок сжимается, а интенсивность излучения достигает экстремальных значений [1]. Характер увеличения интенсивности вблизи нелинейного фокуса близок к режиму формирования коллапса, однако заканчивается стадией насыщения. Остановка коллапса интенсивности реализуется при определенных соотношениях между нелинейными и линейными механизмами пространственной модуляции фазы.

В различных численных и экспериментальных исследованиях самофокусировки [2–6] описывались причины, приводящие к насыщению интенсивности в оптических средах (например, в воздухе, органических жидкостях и др.). Чаще всего указывалось на двух- и трехфотонное поглощения, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), высшие нелинейности показателя преломления, плазменную нелинейность показателя преломления. В теоретическом плане критерий остановки коллапса интенсивности рассматривался в ряде работ. В [3] применен подход Джавана – Келли [7], согласно которому в точке предполагаемого коллапса реализуется баланс фазовых набегов (взятых по модулю), вызванных керровской нелинейностью, с одной стороны, и дифракцией совместно с плазменной нелинейностью, с другой стороны. Необходимо заметить, что данное условие сформулировано чисто феноменологически и не вытекает из строгих математических соотношений. В работе [8] постулируется, что насыщение лавинного роста интенсивности для данного временного слоя импульса определяется балансом оптических сил так называемых линз, связанных с керровской и плазменной нелинейностями. В [8] показано, что эти два подхода дают существенно разные результаты в оценках характеристик, составляющих соотношение баланса вблизи координаты нелинейного фокуса.

Таким образом, существует некий пробел в теоретических исследованиях, связанных с изучением самофокусировки и филаментации мощных лазерных импульсов в оптических средах. Этот пробел можно заполнить, если целенаправленно осуществить решение этой задачи с использованием теоретических подходов, позволяющих получить выражение для пиковой интенсивности в заданной точке дистанции распространения волны, включая координату нелинейного фокуса лазерного пучка. В этой связи в историческом плане важно отметить, что для стационарного уравнения Шредингера с кубичной нелинейностью в [9] была получена асимптотика для интенсивности вблизи точки z при приближении к точке нелинейного фокуса z_f : $I_f \sim \ln(-\ln[z_f - z])/(z_f - z)$.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

ПЕРСОНАЛИЯ

**К 85-летию профессора
Владислава Гавриловича Багрова**

Профессор Владислав Гаврилович Багров – блестящий ученый, педагог и организатор, основатель современной томской школы теоретической физики, воспитавшей несколько поколений первоклассных физиков-теоретиков.

Доктор физико-математических наук (1970 г.), профессор (1971 г.), почетный профессор Томского государственного педагогического университета (1996 г.), заслуженный деятель науки РФ (1997 г.), заслуженный профессор Томского государственного университета (2007 г.).

После окончания в 1961 г. физического факультета Томского государственного университета В.Г. Багров поступил в аспирантуру на кафедру теоретической физики Московского государственного университета, где в 1964 г. под руководством профессора Игоря Михайловича Тернова защитил кандидатскую диссертацию. В годы аспирантуры В.Г. Багрову посчастливилось работать в тесном контакте с корифеями отечественной теоретической физики – Соколовым Арсением Александровичем и Иваненко Дмитрием Дмитриевичем. После окончания аспирантуры, до 1973 г., В.Г. Багров работал на кафедре экспериментальной физики Томского политехнического института, пройдя за пять лет путь от ассистента до заведующего кафедрой.

В этот период, начиная с аспирантуры, В.Г. Багров принимал участие в создании общего математического аппарата квантовой теории синхротронного излучения. На его основе были теоретически исследованы спектрально-угловые и поляризационные характеристики синхротронного излучения ультрарелятивистских частиц, движущихся в ускорителях и накопителях, с учетом квантовых эффектов. В частности, был проведен анализ спиновых эффектов и всесторонне изучен эффект радиационной спиновой самополяризации в синхротронном излучении. В 1965 г. В.Г. Багровым совместно с И.М. Терновым и А.М. Хапаевым был предсказан эффект генерации электромагнитного излучения нейтронами при движении во внешних полях. В этот же период были впервые построены мгновенные угловые распределения синхротронного излучения для полного излучения и компонент линейной поляризации. В последующие годы в работах В.Г. Багрова свойства синхротронного излучения были теоретически изучены методами квантовой теории для всей области значений физических параметров и проведен полный сравнительный анализ результатов, полученных методами классической теории и теории в ультрарелятивистском приближении. Все эти исследования имеют большое теоретическое и прикладное значение для физики и техники ускорителей, астрофизики, физики излучения электромагнитных волн, физики взаимодействия электронов с различными внешними полями.

В 1969 г. В.Г. Багров закончил докторантуру МГУ, защитил диссертацию «Движение и излучение релятивистских частиц во внешних электромагнитных полях» и вернулся в Томск. На тот момент исследования по теоретической физике в Томске велись несколькими небольшими научными группами и практически полностью были сосредоточены на решении узких прикладных задач. За несколько лет В.Г. Багров создает вокруг себя большую научную группу из учеников и единомышленников, в которой теоретическая физика ощущается как самоценная часть науки, имеющая собственные, отличные от других разделов физики, внутренние законы развития и логику, относительно независимую от злобы дня. Усилиями В.Г. Багрова, В.Н. Шаповалова, Д.М. Гитмана и И.В. Тютина за 10 лет, к началу 80-х годов, томская группа физиков-теоретиков получила всесоюзный и международный авторитет, переросла в научную школу. Ее ядром, Alma Mater, ста-



Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 9

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 19.09.2023. Выпуск в свет 27.09.2023. Заказ № 5586.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.11. Уч.-изд. л. 16.93. 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