

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

5·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Май, 2024

№ 5 (798)

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 Оронцио, проф., Неаполь, Италия
Месяц Г.А., акад. РАН, Москва, Россия
Неклюдов И.М., акад. НАН Украины, Харьков
Озтоп Хакан, проф., Элязыг, Турция
Ратахин Н.А., акад. РАН, Томск, Россия
Сагхир Зиад, проф., Торонто, Канада
Саранин А.А., чл.-корр. РАН, Владивосток, Россия
Суржиков А.П., проф., Томск, Россия
Суханов Д.Я., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Тао Вен-Куан, академик Китайской академии наук, Сиань, Китай
Углов В.В., проф., Минск, Республика Беларусь
Ушаков В.Я., проф., Томск, Россия
Чайковская О.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Черепанов В.Н., д.ф.-м.н., Томск, Россия
Чумляков Ю.И., проф., Томск, Россия
Шаповалов А.В., проф., Томск, Россия
Шипилов С.Э., д.ф.-м.н., Томск, Россия

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

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

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Джафаров Р.Г. Модельные уравнения Бете – Солпитера для амплитуды рассеяния хиггсовских скаляров с решениями20
- Павленко А.В., Гришечкин Ю.А., Капшай В.Н. Точные решения двумерного квазипотенциального уравнения с релятивистскими аналогами потенциала гармонического осциллятора27

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Коковин А.О. Кинетическая теория расширения катодной плазмы в неоднородной геометрической конфигурации вакуумного диода35

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Исследование влияния концентрации кобальтовой связки на проникающую способность карбидовольфрамовых ударников при высокоскоростном ударе в стальную мишень-свидетель46
- Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В., Сахненко А.В. Диэлектрические свойства сегнетоэлектрика иодида диизопропиламмония, внедренного в молекулярные сита SBA-1552
- Данилов Е.А., Хачатурян А.А., Гурова Е.М., Шишанов М.В. Теплоемкость и температурная стойкость высоконаполненных композиционных материалов природный графит – фенолформальдегидная смола.....59
- Аникеев С.Г., Кафтаранова М.И., Ходоренко В.Н., Артюхова Н.В., Пахолкина С., Большевич Е.А., Рыжакова В.Г. Исследование структурных и физико-механических свойств модифицированных пористых материалов на основе TiNi 68
- Шулупов И.А., Наркевич Н.А., Буякова С.П. Влияние интенсивной деформационно-термической обработки на структуру и электронное строение Cr-Mn-N -стали77
- Шмаков В.В., Буяков А.С., Буякова С.П. Трещиностойкость керамики $\text{ZrB}_2\text{-SiC-TaB}_2$ со структурой «композит в композите»91
- Кузьминов Е.Д., Дербин А.Ю., Шугуров А.Р. Микроструктура и механические свойства покрытий Ti-Al-Ta-N , полученных методом сильнотоочного импульсного магнетронного распыления100

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Коренков В.В., Гусев А.А., Тюрин А.И., Васюкова И.А., Юнак М.А., Головин Ю.И. Вязкоупругие свойства древесины бука, выявляемые методом динамического механического анализа108

CONTENTS

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Jamousov A.Y., Kuznetsov A.B., Ezhov D.M., Kokh A.E., Svetlichnyi V.A.** Influence of doping with rare-earth elements on spectral-luminescent and nonlinear-optical properties of $\text{NdSc}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal 5
- Yudin N.N., Zinoviev M.M., Podzyvalov S.N., Kuznetsov V.S., Slyunko E.S., Gabdrakhmanov A.Sh., Lysenko A.B., Kalsin A.Yu.** Mid-IR antireflective interference oxide coatings for semiconductor optical substrates 15

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Jafarov R.G.** The model Bethe–Salpeter equations for the Higgs scalars scattering amplitude with solutions 20
- Paulenka A.V., Grishechkin Yu.A., Kapshai V.N.** Exact solutions of a two-dimensional quasipotential equation with relativistic analogues of harmonic oscillator potential 27

PLASMA PHYSICS

- Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Kokovin A.O.** Kinetic theory of cathode plasma expansion in vacuum diode with inhomogeneous geometry 35

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Sammel A.Yu., Skosyrsky A.B., Burkin V.V., Dyachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kudryavtsev V.A., Stepanov E.Y., Chupashev A.V.** Study of the effect of cobalt bond concentration on the penetrating ability of carbide-tungsten impactors during high-velocity impact into a steel target-witness 46
- Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Stukova E.V., Sakhnenko A.V.** Dielectric properties of ferroelectric diisopropylammonium iodide embedded in SBA-15 molecular sieves 52
- Danilov E.A., Khachatryan A.A., Gurova E.M., Shishanov M.V.** Specific heat capacity and temperature stability of highly-filled composite materials natural graphite/phenolic resin 59
- Anikeev C.G., Kaftaranova M.I., Khodorenko V.N., Artyukhova N.V., Pakholkina S., Bolshevich E.A., Ryzhakova V.G.** Study of structural and physical-mechanical properties of modified porous materials based on TiNi 68
- Shulepov I.A., Narkevich N.A., Buyakova S.P.** Effect of intensive deformation-heat treatment on the structure and electronic structure of Cr–Mn–N steel 77
- Shmakov V.V., Buyakov A.S., Buyakova S.P.** Fracture toughness of $\text{ZrB}_2\text{-SiC-TaB}_2$ ceramics with «composite-in-composite» structure 91
- Kuzminov E.D., Derbin A.Yu., Shugurov A.R.** Microstructure and mechanical properties of Ti–Al–Ta–N coatings obtained by high-power impulse magnetron sputtering 100

BRIEF COMMUNICATIONS

- Korenkov V.V., Gusev A.A., Tyurin A.I., Vasyukova I.A., Yunak M.A., Golovin Yu.I.** Viscoelastic properties of beech wood determined by the dynamic mechanical analysis 108

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.18

DOI: 10.17223/00213411/67/5/1

**Влияние допирования редкоземельными элементами
на спектрально-люминесцентные и нелинейно-оптические свойства
кристалла $\text{NdSc}_3(\text{BO}_3)_4$ ***А.Я. Жамус^{1,2}, А.Б. Кузнецов², Д.М. Ежов¹, А.Е. Кох², В.А. Светличный¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследованы оптические свойства новых трехкатионных кристаллов семейства $\text{RE}_x\text{Nd}_y\text{Sc}_z(\text{BO}_3)_4$ (RE – лантаноиды от Sm до Lu; $x+y+z = 4$) (RE:NSB). Определено влияние катиона RE на спектры поглощения и люминесценции кристаллов. Порошковым методом Куртца – Перри оценена эффективная нелинейная восприимчивость кристаллов при генерации второй гармоники (ГВГ) излучения Nd:YAG-лазера (1064 нм, 7 нс). Установлено, что в ряду RE:NSB наибольшую интенсивность люминесценции и эффективность ГВГ показывает кристалл Gd:NSB. Он может быть перспективен в качестве активной среды твердотельных лазеров с самоудвоением частоты.

Ключевые слова: нелинейные оптические кристаллы, неодим-скандобораты, люминесценция, генерация второй гармоники, самоудвоение частоты, Куртц – Перри.

Введение

Растущий спрос на компактные и эффективные источники лазерного излучения видимого диапазона в различных областях, включая обработку и отображение информации, газоанализе, медицине и др., обуславливает актуальность разработки новых материалов для генерации и преобразования лазерного излучения [1]. В настоящее время одним из основных способов получения когерентного излучения в видимом диапазоне спектра является внрезонаторное нелинейно-оптическое удвоение частоты инфракрасного излучения твердотельных лазерно-активных сред на основе ионов переходных и редкоземельных элементов (РЗЭ) с помощью нелинейно-оптических кристаллов (НК), таких как КТР, LN и др. [2]. Альтернативным способом генерации лазерного излучения малой и средней мощности в видимой области спектра, обеспечивающим большую компактность, за счет уменьшения количества элементов внутри резонатора лазера, упрощение процедуры юстировки, а также позволяющим снизить общую стоимость излучающей системы, является использование лазерно-активных сред с самоудвоением частоты [3]. К таким лазерно-активным средам относятся НК, легированные ионами РЗЭ (например, Nd^{3+} [4] или Yb^{3+} [5]), позволяющие одновременно осуществлять когерентную генерацию лазерного излучения в инфракрасном диапазоне и нелинейное преобразование данного излучения в видимую область спектра. Для успешного использования такие многофункциональные оптические материалы должны удовлетворять ряду требований: обладать высокой эффективностью генерации лазерного излучения в ближнем ИК-диапазоне, иметь малые потери на длине волны второй гармоники, обладать хорошими физико-механическими и термооптическими характеристиками. Также должны быть отработаны ростовые технологии, позволяющие получать кристаллы нужных размеров и соответствующего оптического качества [6].

Одним из перспективных классов соединений, претендующих на универсальное решение, удовлетворяющее указанным требованиям, являются нецентросимметричные редкоземельные бораты семейства хантита $\text{REM}_3(\text{BO}_3)_4$ (где RE = Y, La–Lu; M = Al, Fe, Cr, Ga, Sc) [7]. Такие кристаллы обладают широким диапазоном прозрачности и высоким порогом лазерного разрушения. Немаловажно, что в их составе можно в определенных пределах менять катионные элементы без влияния на ацентричность основной матрицы или на ее уникальные свойства [8]. Первая попытка создания кристалла с самоудвоением на основе хантитоподобных боратов была осуществлена со-

* Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-19-00617.

Просветляющие интерференционные оксидные покрытия среднего ИК-диапазона для полупроводниковых оптических подложек*

Н.Н. Юдин¹, М.М. Зиновьев¹, С.Н. Подзывалов¹, В.С. Кузнецов¹,
Е.С. Слюнько¹, А.Ш. Габдрахманов¹, А.Б. Лысенко¹, А.Ю. Кальсин¹

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Определены дисперсии показателя преломления и коэффициента поглощения для монослоев оксида титана и оксида кремния. Разработан дизайн многослойного просветляющего оптического покрытия данных материалов в спектральном диапазоне 0.4–8 мкм. Подобраны режимы нанесения покрытия методом ионно-лучевого распыления на полупроводниковую подложку. Измерены оптические характеристики четырехслойного интерференционного покрытия с просветлением подложки ZGP в диапазоне 2097 нм и 3.5–5 мкм, с остаточным отражением $R \leq 0.2\%$ и $R \leq 2.1\%$ соответственно. Проведены тесты на адгезию и истирание покрытия согласно ГОСТ.

Ключевые слова: ионно-лучевое распыление, оксид титана, оксид кремния, дисперсия, интерференционное покрытие.

Введение

Большой интерес к твердотельным излучателям наблюдается в области создания преобразователей частоты, таких как системы параметрической генерации света (ПГС). Такие источники излучения интересны из-за их преобразования излучения в диапазоне длин волн 2–12 мкм на основе явления параметрической генерации. Для данных задач используются ферроэлектрические оксиды, такие как LiNbO_3 , КТР, КТА и др., способные генерировать излучение в диапазоне длин волн 3–4 мкм [1–4]. В диапазоне 4–12 мкм для генерации излучения используют кристаллы на основе тройных соединений с кристаллической решеткой типа халькопирит: AgGaS_2 , AgGaSe_2 , ZnGeP_2 (ZGP), а также GaSe [5–8]. Повышение эффективности преобразования таких систем является актуальной задачей на текущий момент, достигаемой при помощи нанесения просветляющих покрытий на рабочие грани образца, снижающих френелевские потери на отражение. А одним из главных ограничений при использовании просветляющих покрытий является их порог лазерно-индуцированного пробоя (ПЛИП).

ПЛИП кристаллов зависит как от совершенства структуры самого кристалла, так и во многом от качества полировки рабочих граней и просветляющих покрытий. При нанесении на кристалл интерференционных покрытий его ПЛИП может как увеличиваться, так и уменьшаться. Это зависит от многих факторов, в том числе от выбора материалов покрытия, их жесткости (создания механических напряжений в тонких слоях покрытия), режимов нанесения покрытия, адгезии используемых материалов к подложкам.

Наиболее распространенными материалами для производства оптических покрытий являются соединения оксидов металлов и полупроводников, сульфидов, селенидов, а также фторидов. Оксидные пленки обладают лучшими механическими характеристиками сопротивляемости к появлению царапин и истираемости. В своих предыдущих работах мы использовали такие оксидные материалы, как Nb_2O_5 и SiO_2 , из которых конструировали оптическое просветляющее покрытие [9] на подложке ZGP. Однако оно обладало низким значением ПЛИП. Из литературы известно, что тонкие пленки SiO_2 обладают высоким значением ПЛИП, поэтому было предложено заменить высокопреломляющий слой Nb_2O_5 на другой материал – оксид титана TiO_2 . Цель данной работы – разработка оптического просветляющего покрытия для подложки ZGP в диапазоне накачки 2.097 мкм и генерации 3–5 мкм длин волн.

Расчет интерференционного покрытия

Для расчета дизайна интерференционных покрытий в программном обеспечении Optilayer v.14.57 необходимо знать дисперсии материалов, из которых это покрытие будет изготавливаться. Именно поэтому в первую очередь мы определили дисперсии показателей преломления и погло-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193/>.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.145; 539.12

DOI: 10.17223/00213411/67/5/3

**Модельные уравнения Бете – Солпитера
для амплитуды рассеяния хиггсовских скаляров с решениями**Р.Г. Джафаров^{1,2}¹ *Институт физических проблем Бакинского государственного университета,
г. Баку, Азербайджанская Республика*² *Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика*

Исследуется интегральное уравнение Бете – Солпитера с минимально пертурбативными ядрами для амплитуд рассеяния хиггсовских скалярных частиц с применением приближений лестничных (одночастичный обмен) и двухчастично неприводимых диаграмм (bubble exchange). Получены асимптотические решения соответствующих уравнений для амплитуд рассеяния хиггсовских скалярных частиц. В случае приближения суммирования лестничных диаграмм найдено решение в виде степенной функции s^a в реджевской области изменения энергии $s \rightarrow \infty$. В приближении суммирования двухчастично неприводимых диаграмм при решении соответствующего уравнения с частично пертурбативным ядром найдено асимптотическое решение в виде степенных функций для амплитуды рассеяния хиггсовских частиц.

Ключевые слова: хиггсовская частица, пертурбативные приближения, уравнение Бете – Солпитера.

Введение

Создание механизма нарушения электрослабой (ЭС) симметрии, который порождает массы известных элементарных частиц, является одним из фундаментальных усилий в физике элементарных частиц на протяжении долгих лет. Открытый в 2012 г. коллаборациями ATLAS [1] и CMS [2] новый резонанс с массой около 125 ГэВ и последующие исследования его свойств с энергией центра масс 7 и 8 ТэВ убедительно представили первичную картину механизма спонтанного нарушения симметрии ЭС взаимодействия. Данные, собранные во время запуска Большого адронного коллайдера (БАК) с более высокой энергией центра масс, 13 ТэВ и более, твердо обосновали совместимость измеренного резонанса с бозоном Хиггса стандартной модели (СМ) [3]. С запуском третьего сеанса БАК ожидается предоставление новых данных о протон-протонных столкновениях.

Как известно, в СМ ЭС-взаимодействия описываются калибровочной теорией, инвариантной относительно симметрии группы $SU(2) \times SU(1)$. Механизм спонтанного нарушения симметрии ЭС взаимодействия [4] обеспечивает общую основу, позволяющую сохранить нетронутой структуры этих калибровочных взаимодействий при высоких энергиях. В результате генерируются наблюдаемые массы у калибровочных бозонов $W^\pm$ и Z^0 . Этот механизм постулирует самодействующее сложное дублетное скалярное поле, для которого CP -четная нейтральная компонента приобретает вакуумное математическое ожидание $v = 246$ ГэВ, что задает масштаб нарушения симметрии. Три безмассовых бозона Голдстоуна генерируются и поглощаются, придавая массы калибровочным бозонам $W^\pm$ и Z^0 . Оставшаяся компонента сложного дублета становится бозоном Хиггса – новой и пока уникальной фундаментальной скалярной частицей.

Связь бозона Хиггса с фундаментальными частицами определяется их массами. Взаимодействия бозона Хиггса СМ с калибровочными бозонами и фермионами, а также с самими собой суммированы в следующем лагранжиане:

$$L = -g_{H\bar{f}f} \bar{f}f H + \frac{g_{HHH}}{6} H^3 + \frac{g_{HHHH}}{24} H^4 + \delta_\Gamma V_\mu V^\mu \left(g_{H\Gamma\Gamma} H + \frac{g_{HH\Gamma\Gamma}}{2} H^2 \right),$$

где

$$g_{H\bar{f}f} = \frac{m_f}{v}, \quad g_{H\Gamma\Gamma} = \frac{2m_\Gamma^2}{v}, \quad g_{HH\Gamma\Gamma} = \frac{2m_\Gamma^2}{v^2}, \quad g_{HHH} = \frac{3m_H^2}{v}, \quad g_{HHHH} = \frac{3m_H^2}{v^2}$$

и $\Gamma = W^\pm$, или Z^0 , $\delta_W = 1$, $\delta_{Z^0} = 1/2$.

Точные решения двумерного квазипотенциального уравнения с релятивистскими аналогами потенциала гармонического осциллятора

А.В. Павленко^{1,2}, Ю.А. Гришечкин¹, В.Н. Капшай¹

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

² Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Республика Беларусь

Получены точные решения двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе, описывающего связанные состояния систем двух скалярных частиц одинаковой массы, для четырех релятивистских аналогов потенциала гармонического осциллятора в импульсном представлении в системе центра масс. Найдены парциальные волновые функции в импульсном представлении и условия квантования энергии двухчастичной системы. Для первых двух вариантов потенциала с помощью преобразования Фурье – Бесселя парциальные волновые функции в координатном представлении определены точно, для двух других – приближенно аналитически и численно. Показано, что для одного из вариантов потенциала парциальные волновые функции в координатном представлении имеют дополнительный нуль по сравнению с соответствующими волновыми функциями нерелятивистского гармонического осциллятора.

Ключевые слова: двумерное уравнение Логанова – Тавхелидзе, двухчастичная система, парциальная волновая функция, потенциал гармонического осциллятора, связанные состояния, преобразование Фурье – Бесселя, двумерное координатное представление, условие квантования энергии.

Введение

Несмотря на развитие численных методов решения квазипотенциальных интегральных уравнений квантовой теории поля, по-прежнему особый интерес представляет поиск их точных или приближенных аналитических решений. Одной из основных моделей взаимодействия частиц как в нерелятивистской, так и в релятивистской квантовой теории является потенциал гармонического осциллятора. Как известно, в случае такого потенциала решение уравнения Шредингера получено точно [1, 2]. В работе [3] найдены точные решения квазипотенциального уравнения Логанова – Тавхелидзе в случае аналогов потенциала гармонического осциллятора, заданных в трехмерном импульсном представлении. Для потенциала гармонического осциллятора, заданного в релятивистском конфигурационном представлении, решения уравнения Логанова – Тавхелидзе были получены приближенно аналитически в работах [4, 5] – в трехмерном сферически-симметричном и одномерном случаях. В настоящей работе найдены точные решения двумерного уравнения Логанова – Тавхелидзе в импульсном представлении, описывающего связанные состояния системы двух скалярных частиц одинаковой массы для четырех релятивистских аналогов потенциала гармонического осциллятора.

Некоторые варианты релятивистского потенциала гармонического осциллятора в импульсном представлении

Уравнение Логанова – Тавхелидзе в двумерном импульсном представлении имеет вид

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

где $\mathbf{p}$ – двумерный относительный импульс в системе центра масс; m – масса каждой частицы; $2E$ – энергия двухчастичной системы; $\psi(\mathbf{p})$ – волновая функция; $V(\mathbf{p}, \mathbf{k}; E)$ – релятивистский потенциал, параметрически зависящий от энергии.

Рассмотрим нерелятивистский, не зависящий от энергии, аксиально-симметричный потенциал двумерного гармонического осциллятора, имеющий в координатном представлении вид

$$V(\rho) = \omega^2 \rho^2, \quad (2)$$

где ω – константа связи; $\rho \geq 0$ – модуль двумерного радиус-вектора $\mathbf{p}$. Используя двумерное преобразование Фурье

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{k}) = \int e^{i\mathbf{p}\rho} V(\rho) e^{-i\mathbf{k}\rho} d^2 \rho, \quad (3)$$

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.533

DOI: 10.17223/00213411/67/5/5

**Кинетическая теория расширения катодной плазмы
в неоднородной геометрической конфигурации вакуумного диода***А.В. Козырев¹, В.Ю. Кожевников¹, А.О. Коковин¹¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Представлено теоретическое объяснение явления анодонаправленного ускорения ионов в геометрически неоднородных вакуумных диодах. Объяснение базируется на решении уравнений бесстолкновительной физической кинетики электронов и ионов на примере осесимметричного вакуумного диода. Предложенная теоретическая интерпретация убедительно демонстрирует, что основным механизмом расширения катодной плазмы является бесстолкновительное движение ионов в самосогласованном электрическом поле. Также показана возможность возникновения ионов с «аномально высокими» кинетическими энергиями.

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

Введение

За последние шестьдесят лет в физике вакуумного разряда [1] одной из наиболее широко обсуждаемых тем является эффект «аномального ускорения ионов», который был впервые отмечен А.А. Плютто в экспериментальной работе [2]. Суть этого эффекта заключается в генерации кратковременных всплесков тока положительно заряженных ионов, ускоряющихся в аномальном направлении от катода к аноду. Глобальное распределение электрического потенциала в вакуумных диодах способствует ускорению электронной компоненты катодной плазмы, однако для ионов, с той же точки зрения, более высокий анодный потенциал представляет собой потенциальный барьер, препятствующий расширению плазмы. Тем не менее катодная плазма на стадии вакуумного пробоя направленно расширяется с существенно не тепловыми скоростями $(1-5) \cdot 10^6$ см/с, которые соответствуют кинетическим энергиям ионов в десятки и даже сотни электрон-вольт. Плютто и соавторы исследовали тонкости этого эффекта и предложили различные гипотезы относительно его происхождения [3, 4].

С теоретической точки зрения явление аномального ускорения ионов представляет собой серьезную проблему, требующую адекватного количественного описания. В настоящее время теоретические гипотезы о происхождении анодонаправленного потока ионов можно условно разделить на три группы: взрывные, столкновительные и электродинамические [5]. Учитывая разнообразие гипотез о природе явления, предпочтение отдается моделям, опирающимся на минимальное количество исходных предположений о структуре разряда и составе катодной плазмы. Такой подход реализован в рамках «минимальной» кинетической модели расширения плазмы в плоском (одномерном) вакуумном промежутке, основанной на системе уравнений Власова – Пуассона, в которой эмиссия катодной плазмы при приложении анодного потенциала моделируется заданием простых граничных условий [6–8]. Эта теория без введения частных предположений о происхождении катодной плазмы дала ответ на фундаментальный вопрос о том, почему происходит аномальное ускорение ионов. Расчет позволил оценить средние скорости нетеплового расширения плазмы, а в случае многокомпонентной плазмы, содержащей ионы разного заряда, продемонстрировал поведение двух- и трехзарядных ионов в расширяющейся плазме.

Несмотря на успехи теории [6–8], некоторые аспекты явления аномального ускорения ионов катодной плазмы остались за рамками теории планарного вакуумного диода. В условиях физиче-

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

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.3

DOI: 10.17223/00213411/67/5/6

Исследование влияния концентрации кобальтовой связки на проникающую способность карбидовольфрамовых ударников при высокоскоростном ударе в стальную мишень-свидетель*

А.Ю. Саммель¹, А.Б. Скосырский¹, В.В. Буркин¹, А.С. Дьячковский¹,
А.Н. Ищенко¹, В.А. Кудрявцев¹, Е.Ю. Степанов¹, А.В. Чупашев¹

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

Исследованы особенности высокоскоростного взаимодействия цилиндрических ударников с конической головной частью, изготовленных на основе карбидовольфрамового сплава с кобальтовой связкой при различной концентрации последней. Рассмотрена проникающая способность данных образцов в стальную преграду в диапазоне скоростей взаимодействия 500–850 м/с.

Ключевые слова: *твердый сплав, карбид вольфрама, спекание, легирование, высокоскоростной удар.*

Введение

Разработка ударников с использованием твердых сплавов системы WC–Co является одним из основных направлений конечной (терминальной) баллистики [1, 2]. Известно, что основными физико-механическими свойствами твердых сплавов WC–Co, влияющими на их эксплуатационные свойства, являются твердость, трещиностойкость (ударная вязкость), прочность на сжатие и прочность на изгиб [3]. Основными факторами, определяющими вышеперечисленные свойства твердых сплавов, являются свойства высокотвердых тугоплавких карбидов, свойства цементирующей фазы и их количественное соотношение, особенности взаимодействия металла связки с карбидами, а также средний размер карбидного зерна. Материал связующей фазы при температуре спекания должен хорошо смачивать частицы карбидов, не образовывать с ними фаз, которые бы обладали низкими физико-механическими свойствами. В качестве связующей фазы наибольшее распространение получил кобальт, который хорошо смачивает поверхность карбида вольфрама и не создает собственных карбидных соединений, обеспечивая высокую прочность и ударную вязкость карбидовольфрамовых твердых сплавов.

Особый интерес с точки зрения прикладного применения рассматриваемых материалов для изготовления ударников представляют исследования по выявлению корреляционных зависимостей параметров, которые определяют особенности высокоскоростного взаимодействия и проникающей способности ударников из материалов данного класса [4–7]. Одним из ключевых параметров является концентрация связующей фазы. Исследования, проведенные в данной области [8], показали заметное влияние добавок кобальта различной концентрации как на механические характеристики образцов керамики на основе карбида вольфрама, так и на ее прочностные характеристики при ударно-волновом воздействии. Причем эти зависимости могут иметь противоположные тенденции.

В данной работе экспериментально исследовалось взаимодействие ударников, изготовленных из карбидовольфрамового сплава с кобальтовой связкой различной концентрации, со стальными мишенями-свидетелями.

* Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Диэлектрические свойства сегнетоэлектрика иодида диизопропиламмония, внедренного в молекулярные сита SBA-15

А.Ю. Милинский¹, С.В. Барышников¹, Е.В. Стукова², А.В. Сахненко²

¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Исследованы температурные зависимости диэлектрических и тепловых свойств для нанокompозита на основе органического сегнетоэлектрика иодида диизопропиламмония (DIPAI), внедренного в поры силикатных матриц SBA-15 в сравнении с объемными образцами DIPAI. Обнаружено, что в объемном DIPAI, независимо от температурной предыстории, наблюдается один фазовый переход при нагреве без возникновения сегнетоэлектрической фазы. Для нанокompозитного DIPAI сегнетоэлектрическая фаза возникает уже при первом проходе в интервале 362–378 К.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, иодид диизопропиламмония, нанокompозит, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход.

Введение

Мезопористые силикатные материалы SBA-15 благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в различных областях [1–4]. Стоит подчеркнуть, что композитные структуры, основанные на нанопористых матрицах SBA-15, представляют интерес как в теоретическом, так и в прикладном аспектах. Это обусловлено уникальной способностью к точной настройке размеров и пространственной конфигурации инкапсулированных частиц, что достигается за счет использования разнообразной геометрии пор. Такой подход позволяет создавать материалы с заданными характеристиками. Композиты, основанные на матрицах, заполненных различными веществами, включая металлы, полупроводники, суперионники, жидкие кристаллы и т.д., в последние годы являются объектами интенсивного изучения. Эти исследования (см. работы [5, 6] и ссылки в них) открывают новые горизонты для разработки материалов с заданными функциональными свойствами.

Сегнетоэлектрические свойства частиц в условиях ограниченной геометрии изучены сравнительно мало. Имеющиеся работы в основном посвящены исследованию свойств хорошо изученных сегнетоэлектриков, таких как нитрит натрия, нитрат калия, триглицинсульфат, сегнетова соль, тиомочевина и др. (см. [7, 8] и ссылки в них). Меньшее количество исследований посвящено недавно открытым органическим сегнетоэлектрикам [9], среди которых следует выделить хлорид диизопропиламмония ($C_6H_{16}NCl$), сокращенно DIPAC $P_s \sim 8.2$ мкКл/см², $T_c = 440$ К [10, 11]; бромид диизопропиламмония ($C_6H_{16}NBr$), сокращенно DIPAB $P_s \sim 23$ мкКл/см², $T_c = 426$ К [12–14]; иодид диизопропиламмония ($C_6H_{16}NI$), сокращенно DIPAI. Относительно иодида диизопропиламмония в литературе имеются противоречивые сведения [15, 16]. В работе [16] были получены монокристаллы DIPAI, обладающие спонтанной поляризацией $P_s \sim 33$ мкКл/см² и температурой Кюри 415 К. Однако авторы работы [15] при исследовании кристаллов DIPAI не обнаружили в нем сегнетоэлектрических свойств. В [17] было показано, что для перевода DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние его необходимо нагреть выше температуры 423 К.

В данной работе приводятся результаты исследования диэлектрических и тепловых свойств нанокompозитов, полученных внедрением DIPAI в молекулярные сита SBA-15. Для сравнения исследовались поликристаллические образцы иодида диизопропиламмония.

1. Образцы и методика эксперимента

При комнатной температуре DIPAI принадлежит к орторомбической неполярной хиральной пространственной группе $P2_12_12_1$ [15, 16]. Однако при нагревании в зависимости от растворителя, в котором происходила перекристаллизация DIPAI, возможны два сценария. Согласно работе [15], в которой в качестве растворителя использовался этанол, увеличение температуры до 369 К при-

Теплоемкость и температурная стойкость высоконаполненных композиционных материалов природный графит – фенолформальдегидная смола

Е.А. Данилов¹, А.А. Хачатурян^{1,2}, Е.М. Гурова^{1,3}, М.В. Шишанов²

¹АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита
«НИИГрафит», г. Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет), г. Москва, Россия

Исследованы композиционные материалы системы природный графит – фенолформальдегидная смола с содержанием наполнителя от 75 до 95 мас.%, полученные методом горячего прессования. Изучены температурные зависимости теплоемкости в диапазоне температур 25–200 °С, а также термическая стабильность в диапазоне температур 25–1000 °С. Показано, что с увеличением содержания наполнителя теплоемкость растет нелинейно и отклоняется от ожидаемой аддитивности, причем указанные отклонения нельзя объяснить разложением смолы или эффектом ориентации матрицы на поверхности частиц наполнителя. Высокая термическая стойкость позволяет применять разработанные материалы до температур не менее 400 °С.

Ключевые слова: природный графит, фенолформальдегидная смола, композиционные материалы, топливные элементы, биполярные пластины, теплоемкость, термическая стабильность.

Введение

Композиционные материалы (КМ) на основе графита получили широкое распространение благодаря высокой тепло- и электропроводности, низкой удельной плотности, низкой стоимости, высокой коррозионной стойкости и простоте технологической обработки [1]. Перспективными областями применения КМ на основе графита являются изготовления теплообменных устройств, печатных плат и корпусов приборов. В последние годы одной из наиболее активно развивающихся областей применения данного типа материалов являются электроды твердополимерных топливных элементов.

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) – энергоэффективные устройства, преобразующие химическую энергию, образующуюся в результате реакции кислорода и водорода, в электрическую. Отличительными преимуществами ТПТЭ являются низкая температура эксплуатации и, как следствие, быстрый запуск, высокий КПД и отсутствие загрязняющих выбросов. В зависимости от температуры эксплуатации ТПТЭ делятся на низко- (60–100 °С) [2] и высокотемпературные (120–200 °С) [3], причем устройства, работающие при более высоких температурах, в настоящее время привлекают особое внимание, поскольку для них характерна повышенная скорость протекания реакций, толерантность к примесям в топливе, а также упрощение условий поддержания постоянной температуры [4, 5]. Вместе с тем для их успешного применения требуются электродные материалы с длительной температурной стойкостью не менее 250–300 °С и высокой теплопроводностью для обеспечения теплового режима ТПТЭ.

Ключевым компонентом ТПТЭ являются биполярные пластины, отвечающие за равномерный подвод реагентов и отвод воды и тепла, а также электрический контакт между компонентами в сборке [6]. Для достижения максимальной мощности и долговечности ТПТЭ тепло, образующееся в результате протекания электрохимической реакции, должно непрерывно отводиться. Таким образом, основные требования, предъявляемые к биполярным пластинам, включают в себя высокую теплопроводность и теплостойкость при температурах эксплуатации до 200 °С (с учетом запаса – 250–300 °С). Кроме того, очень важна способность материала биполярной пластины к поддержанию работоспособности в условиях переменных тепловых и электрических нагрузок, что во многом зависит от теплоемкости и линейного коэффициента температурного расширения (КТЛР) материала. Значения данных характеристик определяются, в основном, содержанием наполнителя как компонента с высокой кристалличностью (что отвечает снижению удельной теплоемкости и КТЛР КМ).

Исследование структурных и физико-механических свойств модифицированных пористых материалов на основе TiNi*

С.Г. Аникеев^{1,2}, М.И. Кафтаранова¹, В.Н. Ходоренко¹, Н.В. Артюхова¹,
С. Пахолкина¹, Е.А. Большевич¹, В.Г. Рыжакова¹

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

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Исследованы структурные особенности и физико-механические свойства исходного и модифицированного пористого материала на основе TiNi. Методами оптической и растровой электронной микроскопии с помощью стереометрических методик охарактеризованы параметры порового пространства: пористость, распределение пор и межпоровых перемычек по размеру. Показано, что химическим травлением можно направленно формировать микропористую поверхность стенок пор. Установлено, что применение различных составов травителей и режимов обработок позволяет регулировать структуру, влияющую на деформационно-прочностные характеристики получаемого пористого материала.

Ключевые слова: пористый никелид титана, структура, мартенситные превращения, физико-механические свойства.

Введение

Пористо-проницаемые материалы на основе никелида титана (TiNi), полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), успешно применяют для создания эндопротезов, используемых в различных областях медицины [1–4]. Свойства имплантируемых конструкций на основе пористого материала TiNi определяются методом получения, фазово-химическим составом, пористостью, проницаемостью, размерами пор и перемычек металлического каркаса, шероховатостью и извилистостью стенок пор [4]. Высокая коррозионная стойкость позволяет пористым СВС-сплавам находиться в организме длительное время [4–6]. Оксидный слой на поверхности стенок пор способствует адгезии клеточных популяций и прорастанию биологической ткани. Пористо-проницаемый эндопротез, приобретая свойства композиционного материала, способен выдерживать знакопеременные динамические нагрузки и восстанавливать функции утраченного фрагмента при реконструктивной хирургии. Таким образом, состояние порового пространства материала на основе TiNi имеет важное значение.

Уменьшение сроков интеграции имплантата на основе пористого TiNi в организме возможно за счет создания микропористой поверхности стенок металлического каркаса путем модификации порового пространства растворами кислот. Результаты обработки различными кислотами пористых сплавов на основе TiNi значительно отличаются друг от друга. Для титановых сплавов растворы на основе плавиковой кислоты, HF, являются наиболее эффективными. Даже в слабых растворах, в составе которых присутствует HF, сильно увеличивается скорость протекания коррозионного процесса [7, 8]. Титан относится к категории металлов, которые не поддаются воздействию азотной кислоты, но в соединении с плавиковой кислотой данный раствор является одним из наиболее оптимальных, действующих как на фазы с титаном, так и с никелем. Согласно литературным данным [7, 8], никель обладает высокой коррозионной стойкостью в воде, в растворах солей и щелочей при разных концентрациях и температурах, медленно растворяется в соляной и серной кислотах, однако не стоек к действию азотной кислоты. Выбор модифицирующих составов травителей для формирования микропористой структуры стенок пор основан на анализе литературных данных о методиках травления титановых и никелевых сплавов так, чтобы вытравливанию были подвержены именно фазы Ti₂Ni и Ti₄Ni₂(O,N,C) [7–11].

Характерной особенностью пористых материалов на основе TiNi, полученных методом СВС, является ярко выраженная фазово-химическая неоднородность, что проявляется в формировании большого количества фаз, обогащенных по титану [12–15]. Частицы вторичных фаз Ti₂Ni имеют высокую твердость и хрупкость, в процессе деформации они являются источниками микротрещин

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10045, <https://rscf.ru/project/19-79-10045/>.

Влияние интенсивной деформационно-термической обработки на структуру и электронное строение Cr–Mn–N-стали*

И.А. Шулепов¹, Н.А. Наркевич¹, С.П. Буякова¹

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

Проведены исследования электронных спектров высокоазотистой нержавеющей Cr–Mn–N-стали в зависимости от вида ее обработки: закалки, интенсивной ударной обработки поверхности в видековки с ультразвуковой частотой (УЗК) и деформационно-термической обработки, включающей последовательно проведенные УЗК и термическую обработку электронным лучом (ЭЛЮ). Профили распределения концентраций элементов по глубине, полученные методом послонной оже-спектроскопии, показали, что в процессе УЗК поверхность стали обогащается кислородом, который, скорее всего, располагается на субзеренных границах и линейных дефектах кристаллической решетки, поскольку по результатам исследования на просвечивающем электронном микроскопе отсутствуют рефлексы с большими межплоскостными расстояниями от окислов. Обработка УЗК+ЭЛЮ позволила сформировать субзеренную неразориентированную структуру с размером фрагментов не более 30 нм, где нитриды CrN равномерно распределены в аустените. Исследования электронных спектров показали, что электронные уровни в атомах высокоазотистой стали образуют конфигурации, при которых возможны межатомные оже-переходы, из-за чего оже-пики хрома и марганца сдвинуты в область низких энергий на 5–14 эВ. Было выявлено, что увеличение количества линейных дефектов и протяженность межзеренных границ после УЗК влияет на интенсивность и энергетические сдвиги спектров потерь энергии на возбуждение плазмонов и спектры вторичной ионно-электронной эмиссии.

Ключевые слова: высокоазотистая нержавеющая сталь, аустенит, интенсивная деформационно-термическая обработка, деформационное старение, электронная спектроскопия.

Введение

Определяющим в формировании и стабилизации кристаллических структур является электронная система [1, 2], а от электронного энергетического состояния атомов зависят физико-химические свойства материалов. Исследованиями электронной структуры металлов и сплавов экспериментально и теоретически занимаются длительное время и им посвящено много работ, в частности [3–12]. При теоретических исследованиях в основном рассчитывают зонную структуру, выявляют особенности изменения плотности электронных состояний и химические сдвиги энергетических уровней электронов в атомах в результате фазовых превращений, деформаций, давления, химических реакций и др. [3–5]. В частности, проведено детальное исследование электронной структуры мартенситной B19'-фазы в никелиде титана в зависимости от параметров решетки и положений атомов [3]. Проведен расчет ряда электронных свойств, таких как спектры эмиссии и поглощения, спектры характеристических потерь энергии электронов, оптическая проводимость в двух фазах, а также анализ изменений энергий электронов в атомах, сопутствующих структурному превращению. Авторы работы [4] определили, что в неупорядоченных твердых растворах Al–Si, имеющих гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру, при легировании кремнием наблюдаются изменения топологии поверхности Ферми. Теоретические исследования выявили закономерности изменения атомной и электронной структуры циркония при внедрении гелия и растворении водорода.

Экспериментальные исследования электронного строения материалов проводятся, в основном, методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС – XPS), тонкой структуры поглощения рентгеновского излучения (NEXAFS) [5, 6]. Было определено, что электронная структура сплавов Ti–Ni и TiNi–Cu зависит от соотношения компонентов сплава. Так, при образовании в сплаве Ti–Ni интерметаллического соединения TiNi происходит внутриатомное перераспределение *sp*- и *d*-электронов. Уменьшение заселенности *d*-оболочки Ti по сравнению с чистым металлом компенсируется увеличением числа *p*-электронов Ti. Установлено, что сплав TiNi эквивалентного состава имеет наименее заселенную *d*-оболочку Ti среди сплавов Ti–Ni. При увеличении концентрации Cu в сплавах TiNi–Cu заселенность *d*-оболочки Ti монотонно увеличивается, тогда как количество *d*-электронов Ni и Cu остается неизменным.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, номер проекта FWRW-2021-0009.

Трещиностойкость керамики ZrB_2 – SiC – TaB_2 со структурой «композит в композите»^{*}

В.В. Шмаков^{1,2}, А.С. Буяков^{1,2}, С.П. Буякова²

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

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

Формирование двойной композиционной структуры позволяет значительно повысить трещиностойкость керамических композитов по сравнению со структурой с гомогенным распределением компонентов. Увеличение трещиностойкости в образцах с двойной композиционной структурой объясняется одновременной реализацией нескольких механизмов, направленных на бифуркацию трещины и диссипацию ее энергии, а именно: формирование полей упругих микронапряжений, отклонение трещины при контакте с межфазовыми границами.

Ключевые слова: композит в композите, трещиностойкость, керамика, ZrB_2 , SiC , TaB_2 .

Введение

Стремительное развитие технологий и промышленности часто сопряжено с увеличением температуры эксплуатации установок и машин, что обуславливает необходимость поиска альтернатив металлам и сплавам, зачастую не предназначенных для эксплуатации при температурах выше 1000–1200 °С без систем активного охлаждения [1]. Наиболее широкое использование в качестве высокотемпературных и теплозащитных материалов получили пористые керамики на основе оксидов алюминия и магния. Такие материалы обладают химической инертностью, огнеупорностью и низкой теплопроводностью. Однако недостатком пористых керамик является низкая способность выдерживать циклические и динамические нагрузки, в том числе термические, вследствие низкой трещиностойкости и недостаточной надежности [2].

Керамики и композиты на основе карбидов, боридов и нитридов переходных металлов IV–V подгрупп периодической системы химических элементов являются весьма перспективными материалами, обладающими рядом свойств, недостижимых для большинства металлов и сплавов. Эти керамики характеризуются высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, а также стойкостью к окислению [3]. Растущий интерес к высокотемпературным керамикам указывает на потребность в современных материалах для применения в качестве тепловой защиты в высокотемпературных и высокоэнергетических установках [4].

Тем не менее при всех преимуществах такого рода керамик относительно тугоплавких металлов и пористых термобарьерных оксидных керамических материалов, имманентная хрупкость, обусловленная ионным типом химической связи, существенно ограничивает их ответственное применение [5]. Недавние исследования показали, что приложение подходов к управлению структурой, направленных на создание условий диссипации энергии распространяющейся трещины при ее ветвлении и бифуркации, позволяет существенно увеличить трещиностойкость: мостикованием трещины волокнами и нанотрубками [6], созданием условий реализации механизма Кука – Гордона [7], формированием слоистой и слоисто-градиентной структуры [8]. В работе [9] было показано, что при введении низкомолекулярных включений гексагонального нитрида бора и многостенных углеродных нанотрубок в матрицу тетрагонального диоксида циркония возможен синергизм одновременно нескольких механизмов увеличения трещиностойкости хрупкой керамической матрицы.

Перспективные материалы на основе карбида вольфрама были разработаны авторами работы [10], получившие название «двойные цементированные карбиды». Полученный класс композитов демонстрирует одновременно как высокую износостойкость, так и трещиностойкость, что обычно является компромиссом для системы WC–Co. Обнаруженный эффект достигается за счет формирования развитой сети межфазных границ и увеличения работы распространения трещины.

^{*} Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

Микроструктура и механические свойства покрытий Ti–Al–Ta–N, полученных методом сильноточного импульсного магнетронного распыления*

Е.Д. Кузьминов¹, А.Ю. Дербин¹, А.Р. Шугуров¹

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

Изучены состав, структура и механические свойства покрытий Ti–Al–Ta–N, полученных методами сильноточного импульсного магнетронного распыления и магнетронного распыления при постоянном токе. Установлено, что при сильноточном импульсном распылении ток и мощность магнетронного разряда экспоненциально возрастают во время импульса и достигают пиковых значений, которые на порядок величины превосходят аналогичные характеристики при распылении на постоянном токе. Высокий уровень ионизации распыленных частиц обусловил существенное увеличение количества ионов в потоке частиц, осаждаемых на подложку. Повышение интенсивности ионной бомбардировки растущих покрытий обеспечило подавление роста столбчатых зерен и формирование более плотной и однородной микроструктуры, что позволило улучшить их механические характеристики.

Ключевые слова: Ti–Al–Ta–N-покрытия, сильноточное импульсное магнетронное распыление, механические свойства, структура, элементный состав.

Введение

Нанесение защитных покрытий является одним из наиболее эффективных способов улучшения эксплуатационных свойств различных деталей и механизмов. Необходимость дальнейшего повышения защитных свойств покрытий обуславливает постепенный переход от бинарных соединений, таких как TiN и CrN, к многокомпонентным покрытиям, состоящим из четырех и более химических элементов. В частности, покрытия на основе системы Ti–Al–Ta–N обладают высокими твердостью, износостойкостью, стойкостью к окислению и термической стабильностью [1]. В то же время покрытия Ti–Al–Ta–N, полученные с помощью широко используемого в настоящее время метода реактивного магнетронного распыления при постоянном токе (МРПТ), характеризуются столбчатой микроструктурой [2]. Существенным недостатком подобной микроструктуры является быстрое распространение трещин в глубь покрытий по границам столбчатых зерен, что снижает их надежность и долговечность [3, 4].

Для подавления образования столбчатых зерен в покрытиях ранее было предложено подвергать их в процессе роста бомбардировке низкоэнергетическими ионами [5], которые обеспечивают адатомы дополнительной энергией, увеличивая их подвижность и модифицируя процессы зарождения и роста. В результате формируется однородная плотная микроструктура, способствующая улучшению механических и трибологических свойств покрытий [6]. Для бомбардировки покрытий, осаждаемых методом реактивного магнетронного распыления, часто используются ионы инертного или реактивного газов. Однако бомбардировка ионами инертных газов приводит к их имплантации в поверхностный слой покрытия, где они могут образовывать кластеры или нанопузырьки [7]. В свою очередь, бомбардировка ионами реактивного газа оказывает слабое влияние на процессы формирования микроструктуры, поскольку они имеют существенно меньшую массу, чем атомы большинства металлов, что приводит к снижению эффективности передачи импульса от ионов к адатомам [8].

Более эффективной является бомбардировка растущих покрытий ионами металлов, распыляемых с поверхности мишени. Во-первых, ионы металлов внедряются преимущественно в узлы кристаллической решетки покрытия, а во-вторых, близкие значения масс таких ионов и адатомов обеспечивают эффективную передачу импульса и энергии [9]. Однако для метода МРПТ характерна низкая степень ионизации распыляемых частиц (1–3%) [10], что не позволяет использовать указанные преимущества. В то же время высокий уровень ионизации (до 90%), необходимый для эффективной бомбардировки покрытий низкоэнергетическими ионами, может быть достигнут с помощью метода сильноточного импульсного магнетронного распыления (СИМР) [7].

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0010.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.179.1

DOI: 10.17223/00213411/67/5/13

**Вязкоупругие свойства древесины бука,
выявляемые методом динамического механического анализа***В.В. Коренков¹, А.А. Гусев^{1,2}, А.И. Тюрин¹,
И.А. Васюкова¹, М.А. Юнак¹, Ю.И. Головин^{1,3}¹ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия² Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Методом динамического механического анализа с приложением гармонической осциллирующей нагрузки определены модуль упругости E' , модуль потерь E'' и тангенс угла потерь $\tan \delta$ в микроструктуре древесины бука (*Fagus orientalis*). Установлено, что в диапазоне 0.01–66.66 Гц частотной зависимости всех трех исследованных характеристик не наблюдалось в пределах точности эксперимента. Вместе с тем была установлена зависимость модуля упругости E' от статического напряжения.

Ключевые слова: динамический механический анализ, модуль упругости, модуль потерь, коэффициент механических потерь, акустическая древесина.

Как известно, древесина разных пород – это сложно структурированный, высокоупорядоченный природный полимерный материал [1, 2], находящий самое разнообразное применение [3, 4]. Знание основных свойств и характеристик древесины необходимо для ее лучшего практического использования. При этом, наряду с традиционными прочностными, тепловыми, трибологическими, биохимическими характеристиками разнообразных видов древесины, важен набор других, более деликатных свойств, в частности акустических. Они необходимы при создании музыкальных инструментов, крупных акустических систем для озвучивания больших объемов, специальной внутренней отделке концертных залов и др. Основные акустические требования, предъявляемые к залам с естественной акустикой, заключаются в обеспечении всех зрителей достаточной звуковой энергией, создании диффузного звукового поля, исключающего возможность образования таких акустических явлений, как эхо и фокусирование звука. Необходимо обеспечить оптимальное время реверберации, которое составляет в таких помещениях 0.5–0.7 с [5]. Удовлетворение данных требований достигается рациональным выбором объема, геометрической формы зала, очертания его внутренних поверхностей, а также подбором соответствующих отделочных материалов [6]. Однако до настоящего времени не разработано общепринятых методов оценки древесины для акустических применений кроме экспертных оценок качества готового продукта. Это делает весьма актуальным поиски и адаптацию физических методов характеристики древесных материалов, планируемых к использованию в качестве акустических.

В физическом материаловедении для решения подобных задач широко используют импедансные методы: внутреннего трения и родственные с ними динамический механический анализ (ДМА), бесконтактные методы атомно-силовой микроскопии, колебательные моды наноиндентирования и другие колебательные и акустические подходы [7–9]. Общим для этих методов является наложение на основную квазистатическую нагрузку, вызывающую один из видов деформации (растяжение, сжатие или изгиб) в материале, дополнительных малоамплитудных гармонических осцилляций и регистрация отклика на это воздействие. Поскольку такие компоненты древесины, как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин являются полимерными, использование DMA для характеристики древесины является естественным выбором [10]. Программа обработки первичных данных, регистрируемых DMA, позволяет получить значения комплексного модуля

$E^* = E' + iE'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \varphi + i \sin \varphi)$ и его компонент – модуль упругости E' и модуль потерь E'' , а также тангенс угла потерь $\tan \delta = E''/E'$ при текущем значении основной нагрузки [8–10]. Здесь σ_0 – амплитуда осцилли-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00231 (<https://rscf.ru/project/23-16-00231/>) с использованием оборудования ЦКП ТГУ им. Г.Р. Державина.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 5

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 20.05.2024. Выпуск в свет 24.05.2024. Заказ № 5918.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 13.02. Уч.-изд. л. 14.58. 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

