

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

6·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Июнь, 2024

№ 6 (799)

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

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Радченко А.В., Радченко П.А., Саммель А.Ю., Степанов Е.Ю., Чупашев А. Исследование взаимодействия удлиненных ударников из тяжелого сплава с легкосплавными преградами при низкоскоростном ударе	5
Тягунов А.Г., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Вандышева И.В., Мушников В.С., Зайцева Н.А. О кластерной структуре никель-алюминиевых расплавов.....	11
Ахундова Н.М., Алиева Т.Д. Электрические свойства структур металл – $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te<Pb>$	17
Гынгазов С.А., Васильев И.П., Болтуева В.А., Власов В.А., Насырбаев А. Синтез высокоэнтропийной керамики $(Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_3Al_5O_{12}$ для теплозащитных покрытий.....	24
Воронцов А.В., Утяганова В.Р., Зыкова А.П. Влияние ударной обработки в разных частотных диапазонах на эволюцию структурно-фазового состояния поверхности перлитной стали.....	32
Еремина Г.М., Смолин А.Ю., Мартышина И.П. Численное исследование ударно-волнового нагружения на условия для деактивации клеток рака	39
Еремина Г.М., Смолин А.Ю. Моделирование ударно-волнового нагружения сегмента грудного отдела позвоночника, пораженного остеосаркомой	44
Еремин М.О., Бакеев Р.А., Зимина В.А., Чирков А.О., Пажин А., Стефанов Ю.П. Численный анализ влияния диаметра и длины скважины на режимы истечения газа при предварительной дегазации угольного пласта.....	50

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Джахангирли З.А., Амирасланов И.Р., Рахимли А.Б., Сеидов Р.Г., Байрамова Т.О. <i>Ab initio</i> и экспериментальное исследование электронных и оптических свойств $GaInS_3$	57
Ерина М.В., Дерябин М.И. Определение населенности триплетного состояния молекул акцептора по изменению интенсивности сенсibilизированной фосфоресценции.....	63
Бобров П.П., Костычев Ю.А., Родионова О.В. Использование компактных векторных анализаторов параметров цепей для измерения диэлектрической проницаемости почв.....	71

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Зарипов Р.Г. Соотношения неопределенностей с высшими центральными моментами для квантовых систем.....	81
---	----

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Расулов В.Р., Расулов Р.Я., Уринова К.К., Касымов Ф.У. Размерное квантование в полупроводниках в трехзонном приближении Кейна	87
---	----

ПЕРСОНАЛИЯ

К 85-летию профессора Валентина Натановича Брудного	98
---	----

CONTENTS

CONDENSED-STATE PHYSICS

Batuev S.P., Burkin V.V., Dyachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Radchenko A.V., Radchenko P.A., Sammel A.Yu., Stepanov E.Y., Chupashev A.V. Study of the interaction of elongated heavy-alloy impactors with light-alloy obstacles at low-speed impact	5
Tyagunov A.G., Tyagunov G.V., Baryshev E.E., Vandysheva I.V., Mushnikov V.S., Zaitseva N.A. On the cluster structure of nickel-aluminum melts	11
Akhundova N.M., Aliyeva T.C. Electrical properties of structures metal – $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$	17
Ghyngazov S.A., Vasil'ev I.P., Boltueva V.A., Vlasov V.A., Nasyrbaev A. Synthesis of high-entropy ceramics ($\text{Y}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Lu}_{0.2}\text{Eu}_{0.2}\text{Er}_{0.2}$) $3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ for thermal protective coatings	24
Vorontsov A.V., Utyaganova V.R., Zyкова A.P. Influence of shock treatment in different frequency ranges on the evolution of structure-phase state of perlite steel surface	32
Eremina G.M., Smolin A.Yu., Martyshina I.P. <i>In-Silico</i> study of the effect of shock-wave loading on the conditions for deactivation of cancer cells	39
Eremina G.M., Smolin A.Yu. Simulation of shock-wave impact on the thoracic segment T4-T5 of spine affected by osteosarcoma	44
Eremin M.O., Bakeev R.A., Zimina V.A., Chirkov A.O., Pazhin A., Stefanov Yu.P. Numerical analysis of the influence of the well diameter and length on the gas outflow regimes during preliminary degassing of the coal seam	50

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Jahangirli Z.A., Amiraslanov I.R., Rahimli A.B., Seidov R.G., Bayramova T.O. Ab initio and experimental study of electronic and optical properties of GaInS_3	57
Erina M.V., Deryabin M.I. Determination of the triplet state population of acceptor molecules by changes in the intensity of sensitized phosphorescence	63
Bobrov P.P., Kostychov Yu.A., Rodionova O.V. Using compact vector network analyzers for measuring permittivity of soil	71

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Zaripov R.G. Uncertainty relations with higher central moments for quantum systems	81
---	----

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Rasulov V.R., Rasulov R.Ya., Urinova K.K., Kasymov F.U. Size quantization in semiconductors in the three-band Kane approximation	87
---	----

PERSONALIA

To the 85th anniversary of professor Valentin Natanovich Brudnyi	98
---	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.3

DOI: 10.17223/00213411/67/6/1

Исследование взаимодействия удлинённых ударников из тяжелого сплава с легкосплавными преградами при низкоскоростном ударе*

С.П. Батуев^{1,2}, В.В. Буркин², А.С. Дьячковский², А.Н. Ищенко², А.В. Радченко^{1,2},
П.А. Радченко^{1,2}, А.Ю. Саммель², Е.Ю. Степанов², А.В. Чупашев²

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

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

Рассмотрены экспериментальные и расчетные результаты по низкоскоростному взаимодействию удлинённых ударников из тяжелого сплава с легкосплавными преградами. Приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия удлинённых ударников по нормали к поверхности. Получены значения скоростей ударника после взаимодействия с легкосплавными преградами. Используя математическое моделирование, получены результаты взаимодействия ударника из тяжелого сплава на основе вольфрама с легкосплавной преградой по нормали к поверхности, повторяющие эксперимент и прогнозный расчет под углом.

Ключевые слова: низкоскоростное взаимодействие, ударник, математическая модель, преграда.

Введение

Исследованиям взаимодействия с преградами по нормали к поверхности или под заданными углами встречи удлинённых ударников различных форм и конструкций посвящено значительное число работ [1–11]. Известно, что большая плотность ударника позволяет ему эффективнее проникать в преграду. Однако при внедрении удлинённых ударников наблюдаются некоторые особенности взаимодействия. Одной из особенностей взаимодействия удлинённых ударников является достаточно продолжительный контакт преграды с его поверхностью, что может привести к отклонению ударника от первоначальной траектории движения или его разрушению.

Цель данной работы – изучение особенностей взаимодействия ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама с легкосплавными преградами. Для расчетов взаимодействия ударников с преградами привлекался модифицированный расчетный комплекс EFES [12, 13].

Экспериментальные результаты

Исследовался ударник, внешний вид которого представлен на рис. 1, а. Ударник имел форму удлинённого усечённого конуса, а в качестве материала использовался тяжелый сплав на основе вольфрама. Диаметр ударника был существенно меньше внутреннего диаметра канала трубы испытательной установки. Для ведения по каналу трубы применялось ведущее устройство (рис. 1, б), изготовленное из пластика с применением технологии послойной печати на 3D-принтере. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде, описанном в [14]. Для наблюдения за процессом взаимодействия ударника с преградой использовалась высокоскоростная видеокамера.

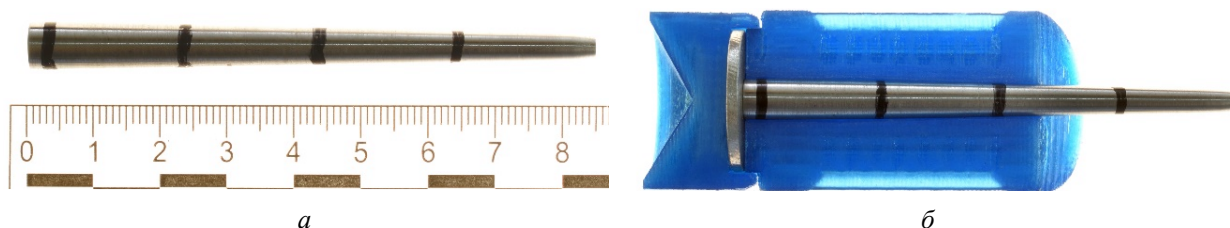


Рис. 1. Внешний вид ударника (а) и его расположение в ведущем устройстве (б)

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

О кластерной структуре никель-алюминиевых расплавов

А.Г. Тягунов¹, Г.В. Тягунов¹, Е.Е. Барышев¹,
И.В. Вандышева¹, В.С. Мушников¹, Н.А. Зайцева¹

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

Никель-алюминиевые расплавы с содержанием алюминия менее 30 ат.% анализируются на основе кластерной модели строения металлических жидкостей. Представлены результаты расчетно-экспериментальных оценок параметров кластерной структуры расплава во взаимосвязи с диаграммой состояния системы Ni–Al. Высказано предположение, что при температурах, превышающих критические ($t \geq t_k$), структура расплава претерпевает фазовый переход по типу «жидкость – жидкость» или LLT-переход.

Ключевые слова: никель-алюминиевый расплав, кластерная структура, физические свойства, фазовый переход, γ - и γ' -фаза, интерметаллиды алюминия.

Компоненты системы Ni–Al обладают высоко симметричной гранецентрированной кристаллической решеткой (ГЦК) и являются изоморфными по своей структуре. Различия зарядов их ядер и атомных радиусов, температур плавления и испарения, энергий межатомных связей и самодиффузии, элементов архитектуры электронных подсистем, плотности, удельного электросопротивления, вязкости и поверхностного натяжения и других характеристик отразились на их существенном удалении друг от друга в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева.

Фазовая диаграмма системы никель – алюминий имеет ряд интересных особенностей, в частности образование интерметаллидных соединений, причем сплавы системы находят широкое применение как основа жаропрочных и интерметаллидных материалов. В разработке эффективно действующих технологий производства литых изделий из таких материалов длительное время принимали участие авторы статьи, что нашло отражение в целом ряде публикаций, например [1, 2].

Диаграмма состояния сплавов системы Ni–Al создана благодаря творческому научному поиску Александера и Вангханка (1937); Шрама (1941); Архангельской, Литвинова и Полевой (1979); Жигунова, Мокрова и Безуглова (1983); Хилперта (1987); Бремера (1988); Удовского, Олдовского и Молдавского (1991).

Наиболее известен вариант Хилперта [3], в котором, к сожалению, отсутствует информация о метастабильных фазах типа Ni_2Al , Ni_3Al_5 , в результате взаимодействия которых образуются интерметаллиды Ni_3Al и $NiAl$ [4, 5]. Кроме того, данный вариант фазовой диаграммы не учитывает мнение Шанка о возможном существовании соединений Al_3Ni , Al_3Ni_2 .

Интересующая нас область диаграммы ограничивается 30 ат.% Al, большая ее часть – это неоднородные никель-алюминиевые твердые растворы или γ -фаза. С увеличением концентрации алюминия структура становится двухфазной, состоящей из двух когерентных фаз: γ - и γ' -фаза или интерметаллид Ni_3Al . Обе фазы, хотя и обладают однотипными кристаллическими решетками, но имеют различные параметры.

Первые фрагменты γ' -фазы обнаруживаются в микроструктуре сплавов, содержащих около 10 ат.% Al. Однако на диаграмме состояний установленный экспериментально факт не нашел отражения.

Для более достоверного понимания характера взаимодействия изучаемых компонентов, особенностей диаграммы состояний сплавов системы Ni–Al используются результаты исследования влияния химического состава и температуры на термодинамические функции. Изменения энергии Гиббса (ΔG) и энергии межатомного взаимодействия (W) рассчитаны по методике, изложенной в монографии [6]. Полученные результаты приведены на рис. 1.

С ростом температуры и увеличением концентрации алюминия величина ΔG интенсивно повышается. Для сплавов, содержащих до 10 ат.% Al при всех приведенных на рис. 1 температурах, характерны линейные зависимости $\Delta G = f(t)$. Дальнейший рост концентрации алюминия способствует снижению интенсивности изменений ΔG , угол наклона касательной к оси абсцисс уменьшается и зависимость приближается к параболическому типу.

Электрические свойства структур металл – $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$ Н.М. Ахундова¹, Т.Д. Алиева²¹ *Азербайджанский государственный экономический университет,
г. Баку, Азербайджанская Республика*² *Институт физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики,
г. Баку, Азербайджанская Республика*

Выращены монокристаллы твердого раствора $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ с избытком свинца до 1.0 ат.%, созданы структуры металл – полупроводник на их основе и исследованы их контактные сопротивления r_k в интервале 77–300 К. Выяснено, что r_k определяется, в основном, донорным действием Pb в указанном кристалле, диффузией компонентов металлов (сплавы (Bi–Sn) и (In–Ag–Au)) в приконтактную область кристалла, а также образованием металлических шунтов в этой области.

Ключевые слова: монокристалл, структура металл – полупроводник, контактное сопротивление, примесь.

Введение

Из-за регулируемой составом узкой запрещенной зоны и относительно более высокой рабочей температуры твердые растворы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ являются перспективными полупроводниковыми материалами для создания инфракрасных преобразователей [1–3]. Эти твердые растворы также являются одними из наилучших среднетемпературных термоэлектрических материалов [4–6]. В полупроводниковых преобразователях одним из основных параметров является удельное сопротивление r_k контакта металл – полупроводник, являющееся их неотъемлемой частью. Термоэлектрики, из которых изготавливаются термоэлементы, имеют, как правило, концентрацию носителей тока порядка 10^{19} – 10^{20} см^{–3} и низкое удельное сопротивление. Поэтому в термоэлементах переходной контакт, являясь омическим, должен иметь r_k не более 10^{-4} Ом·см². Из-за различия электрохимического потенциала полупроводника и металла на их контакте возникает потенциальный барьер. Сопротивление контакта состоит из последовательно соединенных сопротивлений, связанного с прохождением носителей тока потенциального барьера контакта и сопротивлением приконтактной области полупроводника. Вследствие этого свойства границы раздела металл – полупроводник (в том числе высота потенциального барьера на контакте и r_k) определяются разностью энергии сродства электронов в полупроводнике, работой выхода электронов из металла, возникающих в полупроводнике поверхностных состояний, диффузией компонентов контактирующих материалов и их химическим взаимодействием с образованием новых на границе промежуточных фаз, созданием компонентов контактного сплава в приконтактной области полупроводника новых примесных центров. В частности, в термоэлементах необходимо получение омического контакта, т.е. обеспечение на границе металл – полупроводник низкого значения барьера Шоттки. Поэтому можно предположить, что с введением в кристаллы полупроводника примесей (в том числе избыточных атомов компонентов данного кристалла), подбором состава контактного сплава и термообработкой в определенном режиме появится возможность управлять значением и температурной зависимостью сопротивления контакта металл – полупроводник.

В настоящей работе созданы структуры $(57\text{Bi} + 43\text{Sn (мас.%)}) - \text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$, $(95\text{In} + 4\text{Ag} + 1\text{Au (мас.%)}) - \text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$ и исследованы зависимости их контактного сопротивления от концентрации избыточного Pb, температуры и отжига в интервале 77–300 К.

Методика эксперимента

Синтез твердого раствора $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ со сверхстехиометричными атомами свинца 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0 ат.% проводился совместным сплавлением исходных компонентов в вакуумированных до $\sim 10^{-3}$ Па кварцевых ампулах с конусообразным дном при ~ 1245 К в течение 6 ч. В процессе синтеза с целью хорошего перемешивания кварцевая ампула с расплавленными компонентами непрерывно качалась. В качестве исходных компонентов использовались теллур марки Т-сЧ, олово марки ОСЧ-000, свинец марки С-0000, предварительно очищенные от поверхностной окисной пленки. Теллур дополнительно очищался и от возможных примесей методом зонной

Синтез высокоэнтропийной керамики $(Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_3Al_5O_{12}$ для теплозащитных покрытий*

С.А. Гынгазов¹, И.П. Васильев¹, В.А. Болтуева¹, В.А. Власов¹, А. Насырбаев¹

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

Для защиты поверхности лопаток газотурбинных двигателей используют термобарьерные покрытия. Применение для их изготовления таких простых оксидов, как Al_2O_3 , муллит и стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония ограничено из-за их высокой теплопроводности, наличия фазовых превращений. Улучшение свойств термобарьерных покрытий может быть достигнуто применением высокоэнтропийных керамических материалов. На установке искрового плазменного спекания проведен твердофазный синтез высокоэнтропийной керамики $(Y_{0.2}Yb_{0.2}Lu_{0.2}Eu_{0.2}Er_{0.2})_3Al_5O_{12}$. Синтез керамики проводили в условиях вакуума в объеме пресс-формы при температуре 1600 °С под внешним давлением 40 МПа. Изотермическая выдержка составляла 10 мин, а скорость нагрева и охлаждения – 100 °С/мин. Согласно рентгенофазовому анализу, полученный материал представляет собой смесь алюмооксидных гранатов. Электронно-микроскопические исследования показали, что материал имеет кристаллическую структуру с размером микрокристаллов 1–3 мкм. Энергодисперсионный анализ показал равномерное распределение редкоземельных элементов по объему образцов. Измерены теплопроводящие свойства синтезированных образцов керамики и коэффициенты температурного линейного расширения. Показано, что синтезированный материал обладает улучшенными свойствами по сравнению с простыми оксидами.

Ключевые слова: термобарьерные покрытия, высокоэнтропийная керамика, искровое плазменное спекание, твердофазный синтез.

Введение

Поверхность лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) подвергается интенсивному воздействию агрессивной среды и высокой температуры [1]. Для повышения эффективности работы ГТД, защиты необходимо увеличивать рабочую температуру, которая не должна превышать температуру плавления жаропрочных сплавов на основе никеля [2, 3]. Для защиты лопаток от коррозии, повышения рабочей температуры и эффективности газотурбинных двигателей широко используют термобарьерные покрытия (ТБП). Требования к ТБП следующие: высокая температура плавления и хорошая стабильность при высоких температурах [4, 5]; низкая теплопроводность [6]; отличная химическая совместимость с термически выращенным оксидным слоем и материалами подложек [7]; низкие скорость спекания и скорость роста зерна [8]; большой коэффициент теплового расширения [9, 10]. На роль ТБП наиболее подходят тугоплавкие оксиды с низкой теплопроводностью из-за их уникальных теплофизических и механических свойств. В настоящее время широко используются такие материалы, как Al_2O_3 , муллит и стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония (YSZ) [11, 12]. Тем не менее области их применения ограничиваются из-за их высокой теплопроводности, наличия фазовых превращений. К этому стоит добавить их склонность к разрушениям при высоких температурах [10, 13–15].

Алюмоиттербиевый гранат $(Yb_3Al_5O_{12})$ рассматривается как перспективный материал для замены упомянутых выше оксидов [16]. Но его использование в качестве ТБП сдерживается из-за его относительно низкого коэффициента теплового расширения (КТР) и высокой теплопроводности. В этой связи повышение КТР и снижение теплопроводности $Yb_3Al_5O_{12}$ является актуальной задачей материаловедения. Она сегодня решается применением в качестве ТБП высокоэнтропийных оксидных керамических материалов. Впервые концепция высокоэнтропийных материалов была апробирована на сплавах [17, 18]. В многочисленных работах было показано, что высокоэнтропийные сплавы обладают свойствами, недостижимыми обычными сплавами. Еще большее разнообразие свойств может быть достигнуто при конструировании высокоэнтропийных керамических (ВЭК) материалов вследствие большого числа возможного получения видов кристаллической решетки [19, 20]. Как правило, ВЭК для создания ТБК содержит редкоземельные элементы. Так, например, в работах [21, 22] получен ВЭК-материал $(La_{0.2}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Eu_{0.2})_2Zr_2O_7$, который демонстрирует низкую теплопроводность при комнатной температуре $0.76 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ и медленный рост зерна при высоких температурах. В качестве ВЭК-материала, способного улучшить свойства

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

Влияние ударной обработки в разных частотных диапазонах на эволюцию структурно-фазового состояния поверхности перлитной стали^{*}

А.В. Воронцов¹, В.Р. Утяганова¹, А.П. Зыкова¹

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

Изучено влияние низкочастотной и высокочастотной ударной обработки на структурно-фазовое состояние поверхности перлитной стали. Установлено, что при обоих подходах на поверхности перлитной стали образуется слой деформированного материала с повышенной твердостью. Показано, что высокочастотное ударное воздействие по поверхности перлитной стали индуцирует образование дополнительного слоя, состоящего из TiO_2 . Твердость слоя из диоксида титана составляет ~ 1000 HV, что в 2 раза превышает твердость перлитной стали в исходном состоянии. После низкочастотной и высокочастотной обработки поверхности перлитной стали твердость увеличилась на 56 и 25% соответственно. Анализ результатов проведенного скретч-тестирования показал уменьшение коэффициента трения в наибольшей степени для образцов после высокочастотного ударного воздействия.

Ключевые слова: перлитная сталь, низкочастотная ударная обработка, высокочастотная ударная обработка, слой диоксида титана, твердость, скретч-тест.

Введение

В современном машиностроении повышение прочности и трибологических характеристик материалов до сих пор является актуальной задачей. Одним из методов, позволяющих повысить свойства материалов, является ударная обработка. Такой вид обработки позволяет изменить структуру поверхностного слоя материала, достигнув высоких показателей твердости и износостойкости.

Так, в работе [1] исследуется динамический отклик твердых тел на ударные нагрузки. Понимание реакции на удар имеет важное значение для множества применений в промышленной обработке, машиностроении, оборонной промышленности. В обзоре [2] представлены теоретические и экспериментальные исследования механического поведения твердых тел при ударной нагрузке. Подробно обсуждается взаимодействие энергии и импульса на разных масштабах [2], изучаются механизмы структурной эволюции и диффузии при деформационных процессах [3]. Особое внимание уделяется выявлению микроструктурной несовместимости при пластической деформации материалов, локализации деформации на границах различных фаз и межзеренных границах [4].

Авторы работы [5] показали, что основным механизмом циклической деформации является скольжение дислокаций, но также наблюдается механическое двойникование при высоких амплитудах деформации. Обработка поверхности сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ с помощью процесса ультразвуковой нанокристаллической модификации поверхности приводит к образованию градиентно-деформированного слоя со сверхмелкозернистыми структурами, что увеличивает прочность, но снижает пластичность. Обработка поверхности также влияет на усталостную прочность, ухудшая сопротивление трещинообразованию и ускоряя распространение трещин.

В работе [6] авторы оценили влияние ультразвуковой нанокристаллической модификации поверхности на снижение водородной хрупкости в аддитивно изготовленном сплаве Inconel-625. Результаты исследования подтвердили, что ультразвуковая нанокристаллическая модификация поверхности сплава Inconel-625 снижает воздействие водорода на пластичность материала.

В работе [7] был исследован эффект ультразвуковой нанокристаллической модификации поверхности на металлы, полученные аддитивным методом. Ультразвуковая нанокристаллическая модификация поверхности привела к повышению твердости, улучшению поверхностной шероховатости и улучшенной износостойкости, что необходимо для повышения срока службы инструментов.

С целью улучшения характеристик поверхности материала данная работа посвящена изучению влияния ударной обработки различной частоты воздействия ударного инструмента на структурно-фазовое состояние и свойства поверхностного слоя перлитной стали.

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01301.

Численное исследование ударно-волнового нагружения на условия для деактивации клеток рака*

Г.М. Еремина¹, А.Ю. Смолин¹, И.П. Мартышина¹

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

Злокачественные новообразования позвоночника считаются одним из видов рака, наиболее способных к активному развитию вторичных опухолевых процессов. Недавние исследования показали, что к остановке роста и миграции раковых клеток приводят сжимающие напряжения более 40 кПа. В данной работе на мезоуровне было проведено численное исследование влияния механических напряжений терапевтической ударной волны на пораженные неопластическими процессами костные ткани с целью регенерации тканей скелета и деактивации раковых областей. Установлено, что эффективным и безопасным для остановки роста злокачественного образования позвоночника является применение среднеинтенсивного ударно-волнового нагружения.

Ключевые слова: злокачественные образования позвоночника, ударно-волновая терапия, компьютерное моделирование, метод подвижных клеточных автоматов.

Введение

Злокачественные новообразования позвоночника являются одним из видов рака, приводящих к быстрой инвалидизации человека [1]. Известно, что поток внутритканевой жидкости в костном матриксе способствует развитию неопластического процесса (патологический процесс неупорядоченного и неограниченного роста клеток) [2, 3]. Исследования последнего десятилетия показали, что сжимающие и растягивающие напряжения до 1 кПа приводят к высокой миграции раковых клеток [4–8]. Наиболее благоприятным для развития неопластического процесса является диапазон сжимающих напряжений от 1 до 10 кПа [9]. Анализ работ по данной тематике показал общую тенденцию: сжимающее напряжение более 40 кПа при большинстве типе опухолей приводит к остановке роста и деактивации клеток опухоли [10, 11]. В то же время есть ряд работ, которые развивают гипотезу на основе механобиологических принципов о том, что механические сигналы, вызывающие регенерацию биологических тканей, приводят к остановке роста раковой опухоли и деактивации раковых клеток [12, 13]. Согласно механобиологическим принципам, дифференцировка остецитов вызывается сжимающими напряжениями в диапазоне от 3 кПа до 0.15 МПа [14]. Если соотнести с экспериментальными данными по механическим стимулам для развития костных тканей и остановке неопластического процесса, то можно выделить диапазон для остановки роста первичной и вторичной раковой опухоли в костных тканях от 40 кПа до 0.15 МПа. В то же время большие величины внешнего механического воздействия могут приводить к деградации костных тканей. Поэтому актуальным является исследование влияния уровня механической стимуляции на пораженные злокачественными образованиями сегменты позвоночника с целью регенерации костных тканей и деактивации раковых областей [15]. В рамках проведения натурного эксперимента (*in vivo*, *in vitro*) невозможно исследовать с большой точностью влияние механического воздействия на процессы деактивации раковых клеток и регенерацию костных тканей. Для оценки создания условий деградации раковых процессов и регенерации костных тканей на основе механобиологических принципов и механодеструкции на пораженных участках используют методы компьютерного моделирования.

Цель данной работы является определение оптимальной интенсивности ударно-волнового нагружения для создания условий деактивации клеток неопластического процесса на основе мезомодели механического поведения раковой опухоли при ударно-волновом воздействии (УВВ). Полученные результаты могут лечь в основу рекомендаций по оптимальным параметрам ударно-волновой терапии при лечении злокачественных образований опорно-двигательного аппарата.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01107.

Моделирование ударно-волнового нагружения сегмента грудного отдела позвоночника, пораженного остеосаркомой*

Г.М. Еремина¹, А.Ю. Смолин¹

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

Саркомы позвоночника относятся к числу онкологических заболеваний с наиболее негативным прогнозом из-за склонности к быстрому метастатическому распространению. Считается, что быстрый рост опухоли и ее метастатическое распространение связаны с благоприятными механическими свойствами костной ткани для развития опухолевого процесса. В работе представлена макромодель грудного сегмента позвонка с опухолью при ударно-волновом воздействии через аппликатор, расположенный на межverteбальном отростке. Данные моделирования анализировались на основе принципов механодеструкции раковых клеток и стромы. Результаты показывают, что низкоинтенсивное и среднеинтенсивное воздействия могут способствовать деактивации раковых клеток в большом объеме опухоли. В то время как высокоинтенсивное ударно-волновое нагружение может способствовать не только деактивации раковых клеток, но и образованию стромы вокруг опухоли и риску разрушения костной ткани вблизи аппликатора. Полученные данные показывают необходимость дальнейшего изучения факторов, влияющих на развитие неопластического процесса, чтобы минимизировать рост опухоли и предотвратить распространение метастазов на начальной стадии заболевания.

Ключевые слова: злокачественные образования позвоночника, ударно-волновая терапия, компьютерное моделирование, метод подвижных клеточных автоматов.

Введение

Согласно недавним исследованиям [1], злокачественные опухоли, возникающие из мезенхимальной ткани (кости, хрящи), имеют наиболее негативный прогноз. Эти данные важно учитывать при разработке планов лечения пациентов. Для лечения пациентов с неопластическими поражениями позвоночного столба на ранних стадиях наибольшую эффективность показали методы химиотерапии. Однако главным препятствием для доставки лекарственных средств в пораженную область служит образование защитной стромы вокруг опухоли, также известной как микроокружение опухоли. Поэтому актуальной в настоящее время является разработка малоинвазивных и неинвазивных методик лечения пациентов на ранних стадиях, используемых наравне с уже существующими методами лечения. За последнее десятилетие было обнаружено, что напряжение сжатия до 40 кПа (в зависимости от типа опухолевого процесса) способствует росту паренхиматозных опухолевых клеток. Сжимающие напряжения выше 40 кПа подавляют рост опухоли для большинства типов неопластических процессов. Растягивающие напряжения до 10–40 кПа стимулируют рост клеток опухоли, а выше данного диапазона способствуют развитию стромы опухоли [2].

Большинство исследований по разработке методик ингибирования роста и деактивации раковых клеток проводятся *in vitro* [3] и *in vivo* [4]. В исследованиях *ex vivo* основное внимание уделяется гистологическим данным, а также результатам магнитно-резонансной томографии и рентгенографии, которые позволяют выявить деградацию костных тканей, образование фиброзной мембраны и другие признаки опухолевого процесса [5].

Исследования по вышеуказанным темам могут быть ресурсоемкими и подлежать этическим ограничениям. Компьютерное моделирование позволяет оценить влияние различных видов нагружения на разные участки первичного неопластического процесса [6]. Для описания механического поведения биологических тканей наибольшее распространение получили модели линейной упругости [7]. Хотя эта модель достаточно хорошо описывает костные ткани, она не может корректно описать нелинейное поведение тканей межпозвоночных дисков и раковых тканей.

Для описания нелинейного механического поведения опухолевых тканей большое распространение получили гиперупругие модели [8]. Более того, опухолевые ткани демонстрируют поведение, которое в значительной степени зависит от скорости деформации, характерное для вязкоупругого материала [9]. Двухфазные пороупругие модели обычно используются для описания ме-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01107.

Численный анализ влияния диаметра и длины скважины на режимы истечения газа при предварительной дегазации угольного пласта*

М.О. Еремин¹, Р.А. Бакеев¹, В.А. Зимина¹,
А.О. Чирков¹, А. Пажин¹, Ю.П. Стефанов¹

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

На основе связанной газо-геомеханической модели математической физики, учитывающей фильтрацию флюида через упругий деформируемый скелет на основе закона Дарси, выполнен численный анализ влияния диаметра и длины дегазационной скважины на режимы истечения газа при предварительной дегазации угольного пласта. Показано, что увеличение удельных поверхности и длины скважины приводит почти к кратному увеличению массового расхода флюида. Также показано, что при переходе от ствола скважины к устью наблюдается смена режима фильтрации от плоскорадиального к радиально-сферическому. Результаты имеют прикладное значение при проектировании технологии предварительной дегазации угольных пластов.

Ключевые слова: закон Дарси, фильтрация, упругий режим, дегазация.

Введение

Большинство аварийных ситуаций на шахтах обусловлено либо отдельным, либо совместным действием нескольких факторов: 1) избыточное опорное давление, обусловленное зависанием достаточно протяженных участков труднообрушаемой кровли, 2) повышенное содержание метана в угольных пластах, 3) геодинамический режим региона, 4) наличие нарушений сплошности в пределах шахтного поля. Другие факторы имеют несистематический характер и относятся, скорее, к случайным и трудно прогнозируемым.

С действием же первых двух факторов инженерный персонал вынужден бороться практически непрерывно. Это обусловлено тем, что с увеличением глубины разработки кровли пластов зачастую классифицируются как труднообрушаемые. Последнее дополнительно усугубляется тем, что действующие лавы обычно находятся в областях динамического влияния предыдущих выбросов.

Согласно данным работ [1, 2], в естественных условиях залегания угольные пласты обладают низкой проницаемостью, т.е., другими словами, практически не фильтруют. Более того, вмещающие породы, такие как песчаники и алевролиты, а также ряд других, как правило, обладают еще более низкой проницаемостью. В то же время комплекс проводимых мер по предварительной дегазации угольных пластов и каптажу газа зачастую является малоэффективным по причине слабой нарушенности угленосной толщи [3–5]. В силу слабой проницаемости незарегулированных пластов, нагрузка на забой существенно лимитирована сверху по «газовому фактору» [6]. В результате совместное проявление геомеханических и газодинамических явлений (избыточное опорное, а также давление газа в сорбированном состоянии) приводит к остановкам работы шахтного оборудования и необходимости принятия дополнительных мер по устранению аварийных ситуаций. Подобные аварийные ситуации не только существенно снижают экономическую эффективность добычи угля и попутного газа, но зачастую приводят к летальным исходам среди персонала [7].

В связи с этим, предварительная дегазация угольных пластов до начала проведения очистных работ является необходимым этапом для обеспечения геодинамической безопасности их проведения. Для проведения предварительной дегазации пластов используют ряд схем [4, 8] в зависимости от горнотехнических условий, в том числе от условий залегания пласта.

Снижение удароопасности и повышение интенсивности газовыделения впереди забоя являются ключевыми задачами, решаемыми на всех добычных участках стран с развитой угольной промышленностью [9]. Искусственное повышение трещиноватости горного массива в окрестно-

* Работа выполнена в рамках проекта РНФ 21-71-10079.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 537.266.112

DOI: 10.17223/00213411/67/6/9

***Ab initio* и экспериментальное исследование
электронных и оптических свойств GaInS₃**

З.А. Джахангирли^{1,2}, И.Р. Амирасланов^{1,2}, А.Б. Рахимли¹,
Р.Г. Сеидов¹, Т.О. Байрамова²

¹ Институт физики Министерства науки и образования Азербайджана,
г. Баку, Азербайджанская Республика

² Бакинский государственный университет,
г. Баку, Азербайджанская Республика

Электронные и оптические свойства GaInS₃ исследованы экспериментально методом спектральной эллипсометрии, а также теоретически с использованием теории функционала плотности. Определены действительные и мнимые части диэлектрической функции в интервале энергий 0.7–6.5 эВ. Из рассчитанного электронного спектра и плотности энергетических состояний оценена ширина запрещенной зоны. На основе анализа проецированных на атомы парциальных плотностей электронных состояний определен характер химической связи в GaInS₃.

Ключевые слова: теория функционала плотности, спектральная эллипсометрия, зонная структура, диэлектрическая функция, парциальная плотность электронных состояний.

Введение

Двумерные (2D) слоистые материалы становятся все более привлекательными для исследований из-за их необычайных физических свойств [1–4]. Разнообразие атомной структуры двумерных слоистых материалов, например, они могут иметь плоскую, изогнутую, вертикально-симметричную или асимметричную структуру, вызывает интерес к изучению этих систем. Интеркалирование 2D-дихалькогенидов переходных металлов различными ионами приводит к появлению любопытных физических явлений, таких как волны зарядовой плотности, двумерная сверхпроводимость и т.д. [5, 6]. Наряду с монохалькогенидами и дихалькогенидами, в последнее время большое внимание уделяется трихалькогенидам. В зависимости от условий выращивания и соотношения металлов In и Ga несколько слоистых гексагональных фаз In_{1+x}Ga_{1-x}S₃ кристаллизуются в системе In–Ga–S. Помимо гексагональных фаз, ромбическая фаза также кристаллизуется в системе In–Ga–S [7]. Эта фаза тоже имеет слоистую структуру, в которой атомы индия расположены в октаэдрах, а атомы галлия координированы в тетраэдрах. Полученные ромбические фазы устойчивы относительно соотношений металлов (In/Ga) в интервале In_{1+x}Ga_{1-x}S₃, где $x = 0–0.2$.

Полупроводниковый кристалл ромбической фазы GaInS₃ обладает сильно анизотропной вандер-ваальсовой слоистой структурой, легко отслаивается и имеет отличные характеристики для эксфолиации путем интеркаляции до элементарных слоев [8]. Его электронные, магнитные и оптические свойства от объемной до монослойной структуры до сих пор остаются в основном не исследованными.

Для практического применения и связанной с ним необходимостью разобраться в физических процессах, происходящих в 2D-материалах, в том числе в GaInS₃, требуется всестороннее теоретическое и экспериментальное исследование их физических свойств. Так как симметрия и дополнительные особенности структуры 2D-кристалла в первую очередь отображаются в его одночастичных спектрах и, как следствие, в электронных и оптических свойствах, то изучение этих спектров является важной задачей.

В данной работе мы сообщаем об электронных и оптических свойствах ромбического GaInS₃ с использованием первопринципных теоретических методов теории функционала плотности (DFT) и методов спектроскопической эллипсометрии.

Определение населенности триплетного состояния молекул акцептора по изменению интенсивности сенсibilизированной фосфоресценции

М.В. Ерина¹, М.И. Дерябин¹

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия

На основании выражения, полученного с использованием размеченного графа состояний донорно-акцепторных пар, установлена простая аналитическая связь между стационарной населенностью триплетного T_1 -состояния молекул акцептора и кратностями изменения интенсивностей фотовозбуждения донора и сенсibilизированной фосфоресценции акцептора, аналогичная полученной ранее для однокомпонентного раствора. Значения относительной стационарной населенности q_T T_1 -состояния акцептора пары бензофенон (донор) – аценафтен (акцептор), определенные с использованием полученного выражения, хорошо согласуются с результатами, полученными для данной величины известным методом с использованием времен разгорания и затухания сенсibilизированной фосфоресценции. Указаны ограничения применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: триплетные состояния, акцепторы энергии, метод определения населенности, сенсibilизированная фосфоресценция.

Введение

Сведения об изменении параметров органических молекул в триплетном состоянии, получаемые с использованием особенностей их фосфоресценции в твердых растворах при низких температурах, дают важную информацию об исследуемых объектах и процессах, в которые они вовлечены [1]. Излучаемая квантовая интенсивность фосфоресценции равна

$$I = k_r q_T n. \quad (1)$$

Здесь k_r – константа скорости излучательной дезактивации триплетных возбуждений; n – общее число молекул, участвующих в процессе; $q_T = n_T/n$ – относительная населенность триплетного состояния; n_T – число молекул в триплетном состоянии.

Для повышения достоверности извлекаемой информации из особенностей фосфоресценции возникает необходимость оценивать величины, входящие в выражение (1).

Заселение триплетного состояния может осуществляться непосредственно прямым фотовозбуждением молекул [1, 2] или посредством переноса энергии триплетных возбуждений от молекул доноров к молекулам акцепторов [3]. Для определения q_T при прямом возбуждении однокомпонентных растворов обычно пользуются двумя наиболее простыми методами. Первый основан на измерениях времен разгорания τ_i и затухания τ_T фосфоресценции [4, 5]:

$$q_T = 1 - \frac{\tau_i}{\tau_T}. \quad (2)$$

Этот способ может быть использован и для определения q_T молекул акцепторов энергии при триплет-триплетном переносе энергии [6]. Однако использование этого способа при триплет-триплетном переносе энергии возможно только тогда, когда спектр фосфоресценции (СФ) акцептора не полностью перекрывается СФ донора, что во многих случаях не выполняется.

Второй способ [7–9] основан на измерениях изменения интенсивности флуоресценции в результате обеднения основного синглетного S_0 -состояния при переходе части молекул в метастабильное триплетное T_1 -состояние. Такой метод не может применяться для определения q_T при сенсibilизированном заселении T_1 -состояния молекул акцепторов энергии. Это связано с тем, что первое возбужденное синглетное S_1 -состояние донора энергии должно быть ниже S_1 -состояния акцептора, чтобы исключить его прямое возбуждение [3].

В [10] предложен еще один способ определения q_T при прямом фотовозбуждении твердых растворов органических соединений при низких температурах. Этот способ основывается на измерениях изменения интенсивности фосфоресценции при заданном изменении интенсивности

Использование компактных векторных анализаторов параметров цепей для измерения диэлектрической проницаемости почв*

П.П. Бобров^{1,2}, Ю.А. Костычев^{1,2}, О.В. Родионова¹

¹ Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

² Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники), г. Омск, Россия

Приведены результаты исследования характеристик недорогих компактных векторных анализаторов цепей в диапазоне частот от 100 кГц до 3–6 ГГц. С помощью этих приборов проведены измерения комплексной диэлектрической проницаемости почв и опилок твердого диэлектрика. Выполнено сравнение этих данных с результатами измерений с помощью векторного анализатора цепей ZNB20. Показано, что на частотах выше 100 МГц наблюдается рассеяние экспериментальных точек относительно линии измерений ZNB20. Этот недостаток может быть частично устранен при моделировании частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: векторные анализаторы цепей, комплексная диэлектрическая проницаемость, широкий диапазон частот, влажные почвы, опилки твердого диэлектрика.

Введение

Многие экологические и гидрологические приложения требуют знаний о влажности и диэлектрической проницаемости почвы. Результаты измерения зависят от типа датчика и применяемого измерителя. В последние годы благодаря развитию науки и техники, а также углубленному изучению физики почв было разработано несколько методов измерения влажности почвы в полевых условиях. Обзор датчиков влажности, основанных на разных физических принципах, приведен в [1]. В этом исследовании были рассмотрены и обобщены принципы широко используемых датчиков и их различные применения. Кроме того, сравнивались и анализировались преимущества и недостатки различных используемых методов измерения и влияющие побочные факторы.

Наибольшее распространение получили измерители, использующие зависимость диэлектрической проницаемости почв от влажности. В недорогих емкостных датчиках, представляющих собой два или несколько штырей, погружаемых в почву, используется периодическое напряжение прямоугольной формы частотой 50–150 МГц, подаваемое на датчик. Для определения влажности почвы измеряется либо время достижения определенного уровня напряжения (чем больше влажность и диэлектрическая проницаемость, тем больше время зарядки в течение первого полупериода), либо значение напряжения в максимуме (чем больше диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и емкость датчика, тем меньше напряжение). Ряд работ посвящен сравнительному исследованию свойств таких датчиков [2, 3]. Были выявлены определенные недостатки протестированных датчиков, такие как недостаточная чувствительность при некоторых значениях влажности почв, а также ложная зависимость от температуры почвы. Поскольку на частотах ниже 200–300 МГц на диэлектрическую проницаемость почв влияют релаксационные процессы, интенсивность которых зависит от содержания глины в почве [4, 5], измерение влажности такими датчиками возможно только после выполнения индивидуальной калибровки для каждой из почв.

В более совершенных и дорогих датчиках используется зависимость скорости распространения электромагнитной волны вдоль зонда в виде отрезка двухпроводной линии, погруженного в почву, от показателя преломления почвы. Такой метод называют спектрометрией во временной области. Одним из вариантов этого метода является рефлектометрия во временной области (Time Domain Reflectometry – TDR), при котором измеряется время прохождения импульса в разомкнутом отрезке двухпроводной линии от генератора до разомкнутого конца и обратно [6, 7]. В другом варианте измеряется время прохождения импульса от генератора до приемника в двухпроводной линии, имеющей форму петли. Метод называется Time Domain Transmissometry (TDT). Основным преимуществом метода TDT является его нечувствительность к паразитным многократным отражениям импульса, что приводит к более высокой точности измерений и меньшим требованиям к

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10037, <https://rscf.ru/project/23-27-10037/>.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 536.75

DOI: 10.17223/00213411/67/6/12

**Соотношения неопределенностей с высшими центральными моментами
для квантовых систем**Р.Г. Зарипов¹¹ *Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение
ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия*

Рассматривается матричный аналог соотношения неопределенностей Робертсона – Шредингера для термодинамического описания состояний квантовых систем с высшими центральными моментами физических величин. Приводится обобщение квантового неравенства Рао – Крамера в термодинамическом равновесии. Получены новые соотношения неопределенностей.

Ключевые слова: соотношение неопределенностей, матрица, центральные моменты.

Введение

Вопросы точности измерений приобретают заметный интерес, так как квантовые и термодинамические неустранимые ограничения, возникающие в качестве математического следствия основных принципов статистической теории, начинают иметь существенное значение в современных экспериментах. В основе лежат неравенства для дисперсий двух физических величин, вытекающие из соотношения неопределенностей Робертсона – Шредингера [1, 2], обобщающего неравенство Кеннарда [3]. В работе [4] рассматриваются соотношения неопределенностей для трех величин, а также приводится матричный аналог со вторыми центральными моментами физических величин. В продолжении этой работы представляется необходимым изучение неустранимых ограничений, связанных с соотношениями неопределенностей для случая с конечными высшими центральными моментами физических величин при квантовом термодинамическом описании состояний.

1. Неравенство Коши – Буняковского – Шварца

Рассмотрим эрмитовы операторы X и Y в ансамбле со смешанным состоянием и оператором плотности ρ . Запишем флуктуации и средние значения

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

Для центральных моментов n -порядка приведем средние значения

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

Степень коррелированности величин X и Y определяется корреляционными моментами

$$E\left[\frac{\{(\Delta X)^m, (\Delta Y)^n\}}{2}\right] = E\left[\frac{(\Delta X)^m (\Delta Y)^n + (\Delta Y)^n (\Delta X)^m}{2}\right],\tag{3}$$

где $\{(\Delta X)^m, (\Delta Y)^n\}$ есть антикоммутатор.

Дисперсии, являющиеся вторыми центральными моментами, удовлетворяют неравенству Коши – Буняковского – Шварца

$$D(X)D(Y) \geq E[(\Delta X \Delta Y)]E[(\Delta Y \Delta X)],\tag{4}$$

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 541.123:54621

DOI: 10.17223/00213411/67/6/13

**Размерное квантование в полупроводниках
в трехзонном приближении Кейна**В.Р. Расулов¹, Р.Я. Расулов¹, К.К. Уринова², Ф.У. Касымов¹¹ Ферганский государственный университет, г. Фергана, Республика Узбекистан² Кокандский государственный педагогический институт, г. Коканд, Республика Узбекистан

Теоретически исследован микроскопический механизм размерного квантования зоны проводимости и валентной зоны полупроводников кубической и тетраэдрической симметрии в трехзонном приближении Кейна. Показано, что матричное уравнение Шредингера, полученное на основе модели Кейна, аналитически не решается для потенциальной ямы произвольного профиля. Поэтому получены выражения для энергетического спектра в зависимости от двумерного волнового вектора, направленного по интерфейсу гетероструктуры, для различных случаев, различающихся областью значений энергии носителей тока. Проанализирован размерно-квантованный энергетический спектр электронов в зоне проводимости и дырок в подзоне легких дырок в полупроводниках InSb и GaAs в трехзонной модели Кейна.

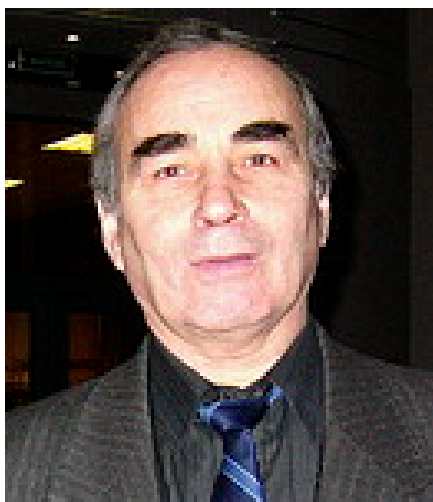
Ключевые слова: размерное квантование, зона проводимости и валентная зона, полупроводники кубической и тетраэдрической симметрии, многозонное приближение Кейна, уравнение Шредингера, энергетический спектр носителей тока, двумерный волновой вектор, интерфейс гетероструктуры.

Введение

Изучение физических свойств размерно-квантованных электронных систем является в настоящее время предметом самого широкого круга исследований вследствие необходимости создания новых нанoeлектронных устройств, а также уникальности их электронной структуры и свойств (см., например, [1–7]). Одной из основных особенностей низкоразмерных систем является модификация их электронной структуры при ограничении размеров системы в одном или нескольких направлениях до размеров, сравнимых с длиной волны де Бройля. В этом случае в направлении, где происходит ограничение размеров, имеет место переход от непрерывного энергетического спектра электронов в зоне проводимости или в валентной зоне к дискретному спектру, характеризующемуся определенным дискретным набором энергетических уровней. Энергии данных дискретных уровней определяются параметрами ограничения волновых функций электронов в данном направлении, т.е. соответствием размеров системы длины стоячих волн де Бройля, формирование которых возможно в данной системе [3–7].

В настоящее время привлекают значительное внимание оптические переходы между уровнями в размерно-квантованной яме (РКЯ), которые находят применение в фотопреобразователях инфракрасного диапазона [7–9]. Для полупроводников с простой зоной расчет межуровневых переходов для РКЯ произвольного потенциала был проведен ранее в работах [10–13]. В то же время межуровневые оптические переходы в РКЯ дырочной проводимости представляют интерес в связи с зависимостью поглощения света от степени его поляризации, которые имеют практическое применение [8]. Теоретическое исследование такого рода задачи затруднено своеобразностью зонной структуры полупроводника. В частности, в [14] такая задача в случае прямоугольной РКЯ с фиксированной толщиной решена численно. Однако даже малая вариация толщины или глубины РКЯ может сильно изменить конечный результат, что затрудняет анализ промежуточных расчетов. В работе [15] на основе теории возмущения получены аналитические выражения для энергетического спектра и волновой функции дырок, а в [15, 16] исследовано межподзонное поглощение поляризованного излучения в бесконечно глубокой квантовой яме полупроводника. Расчеты проведены в приближении Латтинжера – Кона [17, 18] для полупроводников с решеткой цинковой обманки.

ПЕРСОНАЛИЯ

**К 85-летию профессора
Валентина Натановича Брудного***В.Н. Брудный*

Брудный Валентин Натанович окончил радиофизический факультет Томского государственного университета в 1965 г. по специальности «радиофизика и электроника». После обучения в аспирантуре с 1968 г. – научный сотрудник, с 1973 г. – старший научный сотрудник, с 1994 г. – заведующий отделом физики полупроводников СФТИ. С 2010 г. по настоящее время – директор Научно-образовательного центра «Нанoeлектроника» Томского госуниверситета. По совместительству с 1991 г. – доцент кафедры полупроводниковой электроники, а с 1995 г. по настоящее время – профессор кафедры физики полупроводников Томского госуниверситета. В 1973 г. защитил кандидатскую, в 1993 г. докторскую диссертацию. Звание старшего научного сотрудника присвоено ВАК в 1977 г., звание профессора – в 2005 г.

Научные интересы В.Н. Брудного связаны с решением проблем радиационного модифицирования полупроводников сложного состава. Это научное направление было сформировано им в Сибирском физико-техническом институте им. акад. В.Д. Кузнецова и Томском государственном университете в далекие 1970-е гг. и успешно развивается. Результаты этих исследований являются пионерскими, широко известны и признаны как в России, так и за рубежом. Совместно с сотрудниками им опубликовано более 230 научных статей в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, 1 монография, получено 23 авторских свидетельства и патента.

Заслуги В.Н. Брудного в области радиационного материаловедения полупроводников отмечены научной общественностью: в течение многих лет он является членом Научного Совета по радиационной физике твердого тела РАН, неоднократно приглашался в оргкомитеты отечественных и зарубежных конференций, симпозиумов.

В.Н. Брудный принимает активное участие в педагогическом процессе на физическом факультете ТГУ при подготовке магистров и бакалавров. Так, им разработаны и читаются оригинальные курсы лекций «Физика неупорядоченных полупроводников», «Дефекты в полупроводниках», «Физические основы микроэлектроники», «Введение в специализацию». Под его руководством защищены восемь кандидатских и одна докторская диссертации.

Последние десять лет основная научная деятельность В.Н. Брудного акцентирована на решение задач моделирования свойств радиационно-модифицированных полупроводников, выявления общих закономерностей их поведения в полях ионизирующих излучений, а также на исследование границ раздела и свойств наноразмерных кластеров в полупроводниках. За эти годы В.Н. Брудный участвовал в выполнении 16 НИР, в 13 из них – в роли руководителя проекта. Значительное место в его исследованиях занимают практически важные разработки технологии получения полупроводниковых гетероструктур и полупроводниковых кристаллов сложного состава для создания элементной базы нано- и оптоэлектроники (радиационно-стойкие структуры, материалы для СВЧ-, терагерцовой электроники и светодиодов). По результатам исследований за последние 10 лет им опубликовано 48 статей в ведущих научных журналах, получено 5 патентов и 3 документа «наука».

В течение десятков лет В.Н. Брудный являлся членом диссертационных советов Томского госуниверситета и Томского политехнического университета, в настоящее время – член диссертационного совета.

ционного совета 1.3.01 Томского госуниверситета. С 1998 г. – член-корреспондент Российской академии естественных наук.

На протяжении своей деятельности В.Н. Брудный принимает активное участие в работе многих научных журналов, в том числе и журнала «Известия вузов. Физика», рецензируя для публикаций статьи как молодых специалистов, корректно указывая на недостатки работы и оказывая помощь, так и признанных ученых.

Брудный В.Н. награжден нагрудными знаками «Почетный работник высшего профессионального образования РФ», «Почетный работник науки и техники РФ», «Изобретатель СССР», рядом медалей Томского госуниверситета, грамотами администрации г. Томска и ТГУ.

Коллеги, ученики и друзья поздравляют Валентина Натановича с 85-летием и от всей души желают крепкого здоровья, благополучия, оптимизма и активной творческой и научной деятельности.

*Ивонин И.В., д.ф.-м.н., зам. проректора по НИД ТГУ
Эрвье Ю.Ю., д.ф.-м.н., зав. кафедрой физики полупроводников ФФ ТГУ*

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 6

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 19.06.2024. Выпуск в свет 20.06.2024. Заказ № 5950.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.63. Уч.-изд. л. 13.02. 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

