

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

8·2023

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Август, 2023

№ 8 (789)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Сараева А.А., Выродова А.В., Кукстаузен Д.А., Кириллов В.А. Температурная зависимость модуля упругости и эффект памяти формы в монокристаллах высокоэнтропийного сплава $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{34.5}\text{Ni}_{5.5}$ с ГЦК–ГПУ-мартенситным превращением.....	5
Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Порфирьев М.А., Крюков Р.Е., Шляров В.В. Структура и фазовый состав поверхностного слоя выкружки рельсов после эксплуатации.....	14
Ушаков А.В., Федоров Л.Ю., Карпов И.В. Особенности электропереноса в наночастицах CuO , синтезированных в плазме дугового разряда низкого давления.....	21
Черепанов Д.Н., Вовнова И.Г., Соловьева Ю.В., Старенченко В.А. Моделирование субструктур, формирующихся при умеренных и мегапластических деформациях в ГЦК-монокристаллах.....	31

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Акинцов Н.С., Копытов Г.Ф., Невечера А.П., Юнцзе Ян. Лоренц-инвариантные формы движения классической релятивистской частицы в 3+1-измерениях.....	41
Ласуков В.В. Реликтовое гравитационное поле волновой и неволновой природы в геометродинамике Логунова.....	50
Скобелев В.В. Определение вероятностных параметров в системе нейтрино и антинейтрино.....	61
Томилова И.В., Александрова А.Г., Попандопуло Н.А., Кучерявиченко Н.А., Блинкова Е.В. Анализ динамической структуры околосолнечного космического пространства с целью поиска орбит, пригодных для утилизации и паркинга отработавших ИСЗ.....	68

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Муратов Т.Т. Влияние эффекта Зеемана на процесс трехчастичной рекомбинации в ультрахолодной плазме.....	74
---	----

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Лозовой К.А., Дирко В.В., Коханенко А.П., Кукунов О.И., Соколов А.С., Акименко Н.Ю., Хомякова К.И., Диб Х., Войцеховский А.В. Двумерные материалы на основе элементов групп VA и VIA: методы получения и перспективы использования.....	80
Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В. Диэлектрические свойства частиц речного песка в зависимости от их размеров и наличия глинистых примесей.....	91
Калытка В.А., Коровкин М.В. Механизм нелинейной квантовой поляризации в протонных полупроводниках и диэлектриках.....	101

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Чашин В.В., Липатов Е.И. Моделирование просветляющего покрытия на алмазе путем изменения поверхностного рельефа.....	115
Паньков А.А. Математическая модель тактильного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным датчиком.....	120

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Евсеев Н.С., Матвеев А.Е., Бельчиков И.А., Жуков И.А., Ворожцов А.Б., Мубараков Р.Г. Получение высокоэнтропийных композитов на основе Hf-Ti-Cr-FeV-N в режиме высокотемпературных экзотермических реакций.....	131
---	-----

CONTENTS

CONDENSED-STATE PHYSICS

Kireeva I.V., Chumlyakov Y.I., Saraeva A.A., Vyrodova A.V., Kuksgauzen D.A., Kirillov V.A. Temperature dependence of the elastic modulus and shape memory effect of $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{34.5}\text{Ni}_{5.5}$ high-entropy alloy single crystals with FCC-HCP martensitic transformation	5
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Porfiriev M.A., Kryukov R.E., Shlyarov V.V. Structure and phase composition of the surface layer of fillets after operation	14
Ushakov A.V., Fedorov L.Yu., Karpov I.V. Special features of electric transfer in CuO nanoparticles synthesized in a low-pressure arc discharge plasma	21
Cherepanov D.N., Vovnova I.G., Solov'eva Yu.V., Starenchenko V.A. Mathematical modeling of deformation substructures in FCC single crystals under moderate and megaplastic (severe) deformations	31

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Akintsov N.S., Kopytov G.F., Nevecheria A.P., Yong-Jie Yang. Lorentz invariant forms of motion of classical relativistic particles in 3+1 dimensions	41
Lasukov V.V. Relic gravitational field of wave and non-wave nature in Logunov's geometrodynamics	50
Skobelev V.V. Determination of probabilistic parameters in neutrino and antineutrino system	61
Tomilova I.V., Aleksandrova A.G., Popandopulo N.A., Kucheryavchenko N.A., Blinkova E.V. Dynamic structure analysis of the near-earth space to search for orbits suitable for disposal and parking of spent spacecrafts	68

PLASMA PHYSICS

Muratov T.T. Influence of the Zeeman effect on the three-body recombination process in the ultra cold plasma	74
---	----

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Lozovoy K.A., Dirko V.V., Kokhanenko A.P., Kukenov O.I., Sokolov A.S., Akimenko N.Y., Khomyakova K.I., Deeb H., Voitsekhovskii A.V. Two-dimensional materials of groups VA and VIA: methods of synthesis and perspectives of application	80
Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V. Dielectric properties of river sand particles depending on their sizes and the presence of clay impurities	91
Kalytka V.A., Korovkin M.V. Mechanism of nonlinear quantum polarization in proton semiconductors and dielectrics	101

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Chashchin V.V., Lipatov E.I. Simulation of the antireflection coating on a diamond by changing the surface relief	115
Pan'kov A.A. Mathematical model of tactile polymer coating with built-in fiber optic sensor	120

BRIEF COMMUNICATIONS

Evseev N.S., Matveev A.E., Belchikov I.A., Zhukov I.A., Vorozhtsov A.B., Mubarakov R.G. Production of high-entropy composites based on Hf–Ti–Cr–FeV–N in the mode of high-temperature exothermic reactions	131
---	-----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.371:548.55

DOI: 10.17223/00213411/66/8/1

Температурная зависимость модуля упругости и эффект памяти формы в монокристаллах высокоэнтропийного сплава $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{34.5}\text{Ni}_{5.5}$ с ГЦК–ГПУ-мартенситным превращением

И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹, А.А. Сараева¹,
А.В. Выродова¹, Д.А. Куксгаузен¹, В.А. Кириллов¹

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

В монокристаллах высокоэнтропийного сплава $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{34.5}\text{Ni}_{5.5}$ (ат.%), ориентированных вдоль $[\bar{1}23]$ - и $[\bar{1}44]$ -направлений, исследованы температурная зависимость модуля упругости Юнга $E(T)$ и эффект памяти формы (ЭПФ) в условиях изотермической деформации при температуре M_s при растяжении. Показано, что в температурном интервале проявления ГЦК–ГПУ-мартенситного превращения (МП) на температурной зависимости $E(T)$ наблюдается уменьшение модуля упругости, характерное для МП. Температура, при которой происходит уменьшение модуля упругости на зависимости $E(T)$, совпадает с температурой M_s для начала ГЦК–ГПУ-превращения при охлаждении в свободном состоянии. Металлографические исследования ГПУ-мартенсита на поверхности образцов показали, что ГПУ-мартенсит является полностью обратимым после отжига при 523 К, 15 мин, когда МП развивается в одной системе, и частично обратимым, если МП развивается в двух системах. Максимальный ЭПФ при изотермической деформации составил 12 и 13% соответственно для кристаллов $[\bar{1}44]$ и $[\bar{1}23]$, который по величине оказался меньше теоретической величины деформации превращения 17.5 и 15.7% для соответствующей ориентации при растяжении для ГЦК–ГПУ-превращения. Физическая причина различия между полученным ЭПФ и теоретическими значениями деформации превращения в исследованных кристаллах связана с развитием ГПУ-мартенсита во вторичных системах, которые тормозят обратимое движение частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ при нагреве после снятия нагрузки.

Ключевые слова: монокристаллы, высокоэнтропийный сплав, ГЦК–ГПУ-мартенситное превращение, модуль упругости, эффект памяти формы.

Введение

Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК) высокоэнтропийного сплава (ВЭС) является новым классом сплавов и в настоящее время привлекают внимание исследователей и инженеров [1–4]. ВЭС имеют высокую конфигурационную энтропию, большие искажения кристаллической решетки, которые затрудняют движение дислокаций. Наиболее широко исследованным ВЭС с ГЦК-решеткой является стабильный эквиатомный сплав Кантора $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mn}_{20}$, который обладает уникальным сочетанием высокой прочности с хорошей пластичностью и вязким разрушением, особенно в области криогенных температур [4]. Новые неэквиатомные сплавы, разработанные на основе сплава Кантора, такие как $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{40-x}\text{Ni}_x$ ($x = 3, 5, 7, 10$) (ат.%), имеют большой инновационный потенциал для практического применения как сплавов с высокотемпературным ЭПФ (эффектом памяти формы) [5]. Преимущество этих новых ВЭС с ГЦК–ГПУ (гексагональная плотноупакованная решетка)-превращением определяется, во-первых, низкой стоимостью компонентов по сравнению с другими высокотемпературными сплавами на основе TiNi, содержащими дорогие элементы Pt, Pd и высокотемпературные элементы Zr, Hf [6]. Во-вторых, хорошими технологичными и коррозионными свойствами, делающими эти сплавы более пригодными для их массового использования как объемных элементов значительной массы, например, для соединения труб [2, 7].

Упругие свойства являются фундаментальными физическими свойствами, которые прямо связаны со стабильностью решетки при межатомных взаимодействиях в объеме кристалла и определяют механическое поведение сплавов, в том числе их способность к мартенситным переходам. Модуль упругости Юнга и его температурная зависимость $E(T)$ исследованы на моно- и поликри-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-19-00016.

Структура и фазовый состав поверхностного слоя выкружки рельсов после эксплуатации

Ю.Ф. Иванов¹, В.Е. Громов², М.А. Порфирьев², Р.Е. Крюков², В.В. Шляров²

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

² *Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия*

Методами просвечивающей электронной микроскопии исследована структура, фазовый состав и дефектная субструктура поверхностных слоев выкружки (0, 10 мм) рельсов специального назначения категории ДТ400ИК после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге, приведшей к их изъятию. Показано, что пластины феррита и цементита дефектны и содержат дислокации, расположенные хаотически, либо формирующие сетчатую субструктуру. Установлено формирование областей с субмикро- и нанокристаллической многофазной структурой с размером кристаллитов α -фазы 50–75 нм, частиц цементита 3–8 нм. Присутствуют области с включениями цементита глобулярной формы и размерами 150–200 нм.

Ключевые слова: *поверхность, рельсы, эксплуатация, наноструктура, фазовый состав, электронная микроскопия.*

Введение

На долю железнодорожных перевозок в мире приходится до 85% грузооборота и более 50% пассажирских перевозок. Рост интенсивности и грузонапряженности железнодорожного транспорта требует высокой эксплуатационной стойкости рельсов. По данным РЖД износ и контактно-усталостные дефекты являются основными причинами изъятия рельсов из эксплуатации [1]. Для решения этой проблемы три года назад на АО «ЕВРАЗ-объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» начато производство 100-метровых рельсов, закаленных сжатым воздухом, повышенной износостойкости и контактной выносливости (категория рельсов ДТ400ИК) для эксплуатации в прямых участках пути со скоростями до 200 км/ч и кривых участках без ограничения по грузонапряженности.

Понимание физической природы и закономерностей формирования структурно-фазовых состояний, дефектной субструктуры и свойств верхней части рельсов после эксплуатации лежит в основе создания рельсов, предназначенных для применения в особых условиях [1]. В настоящее время только использование высокоинформативных методов физического материаловедения (и в первую очередь просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ)) позволяет локально осуществлять комплексный анализ по сечению рельсов.

Актуальность информации в этой области определяется практической значимостью проблемы повышения качества рельсов. Только за последние годы накоплен значительный объем информации в этой области в работах отечественных [1, 2] и зарубежных исследователей [3–7]. Сформированный в [1, 8–15] банк данных об эволюции структурно-фазовых состояний и свойств рельсов при длительной эксплуатации можно считать основой физического материаловедения сталей перлитного класса. В обзорной статье [16] отмечено, что повреждаемость поверхностных слоев рельсов существенным образом зависит от их местоположения, при этом поверхностные слои выпуклой поверхности верхней части рельсов подвергнуты деформационному упрочнению в большей степени, чем поверхность катания. Цель работы – анализ структуры и фазового состава поверхностного слоя выкружки после эксплуатации в экстремальных условиях.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использованы образцы 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК после эксплуатации на Забайкальской железной дороге после изъятия по дефекту 44.0 – боковой износ головки рельса сверх допустимых норм по всей длине [17]. Рельсы были изготовлены из стали 90ХАФ, элементный состав которой регламентируется ГОСТ 51685-243 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017 РЖД. Рельс был уложен 04.11.2020 при смене наружной рельсовой нити в кривой $R = 324$ м на спусковом участке пути. Боковой износ рельса составил 17 мм, пропущенный тоннаж на дату изъятия – 234.7 млн т брутто.

Исследование структурно-фазового состояния и дефектной субструктуры проводили методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг, используя прибор

Особенности электропереноса в наночастицах CuO, синтезированных в плазме дугового разряда низкого давления*

А.В. Ушаков¹, Л.Ю. Федоров¹, И.В. Карпов¹

¹ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», г. Красноярск, Россия

Наночастицы оксида меди были синтезированы методом испарения-конденсации в плазме дугового разряда низкого давления с последующим отжигом при температуре 200 °С. Рентгеноструктурный анализ и последующая обработка полученных дифрактограмм по методу Ритвельда показали образование моноклинной монофазы наночастиц CuO со средним размером кристаллитов ~ 8 нм. Просвечивающая электронная микроскопия доказывает образование наночастиц неправильной формы в диапазоне размеров 5–16 нм. Механизм проводимости на переменном токе изучался в частотном диапазоне 50 Гц – 1 МГц и в диапазоне температур 373–573 К. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что механизм проводимости на переменном токе в наночастицах CuO может быть успешно объяснен с помощью модели коррелированных барьерных прыжков, которая позволяет определить значения максимальной высоты барьера и характерного времени релаксации. Было обнаружено, что прыжки биполяронов становятся заметными до определенной температуры, выше которой преобладают прыжки монополярона. Также были рассчитаны физические параметры, такие как расстояние прыжка и плотность дефектных состояний. Исследования фотолюминесценции подтверждают наличие поверхностных дефектов в наночастицах CuO.

Ключевые слова: оксид меди, дуговой разряд, проводимость, поляроны.

Введение

Наночастицы оксидов металлов вызывают значительный интерес из-за их потенциального применения в таких областях науки и техники, как газовые сенсоры, гетерогенные катализаторы и суперконденсаторы [1–3]. CuO является основой купратных высокотемпературных сверхпроводников. Он имеет моноклинную кристаллическую структуру и является полупроводником *p*-типа с запрещенной зоной 1.2–1.8 эВ. Наноматериалы оксида меди имеют более низкий поверхностный потенциальный барьер, чем у металлов, что влияет на свойства автоэлектронной эмиссии [4]. В CuO наблюдались магнитные фазовые переходы [5]. Он также играет важную роль в оптоэлектронике и устройствах солнечных батарей [6, 7]. Наноструктурированные полупроводники *p*-типа на основе оксидов металла также широко исследуются в качестве материалов для ионно-литиевых электродов [8].

Электрические свойства наноматериалов существенно отличаются от свойств массивных аналогов из-за повышенного количества поверхностных атомов и дефектов на границах зерен. В этом отношении поверхность наноматериалов подобна аморфным материалам с большим количеством дефектов, играющих важную роль в проводимости [9]. Для изучения природы дефектных центров широко используются исследования проводимости на переменном токе. Механизм проводимости в аморфных полупроводниках и наноматериалах обычно описывается с использованием следующих теоретических моделей – квантово-механическое туннелирование, коррелированные прыжки через барьер (Correlated Barrier Hopping), модель туннелирования больших и малых поляронов.

В модели коррелированных барьерных прыжков (КБП) процесс проводимости описывается перескоком носителей заряда между дефектными центрами через разделяющий их потенциальный барьер. Высота барьера коррелирует с расстоянием *R* между центрами дефектов. Эта модель впервые была использована при исследованиях диэлектрических характеристик пленок оксида скандия [10]. Позже модель КБП была расширена для объяснения проводимости в халькогенидных стеклах [11], в которых прыжки биполяронов происходят между заряженными дефектными центрами (D^+ и D^-) при низких температурах. Центры D^0 образуются за счет D^+ и D^- при высоких температурах, вызывая прыжки монополяронов.

В наночастицах CuO в роли дефектных центров выступают кислородные вакансии. В ряде работ было показано, что на проводимость наночастиц CuO на переменном токе влияют также объемная доля, толщина и неоднородность границ зерен [12–14]. Экспериментальные данные проводимости на переменном токе в оксидах металлов представлены достаточно подробно. Несмотря на

* Работа выполнена в рамках госзадания ES-2021-0026.

Моделирование субструктур, формирующихся при умеренных и мегапластических деформациях в ГЦК-монокристаллах*

Д.Н. Черепанов¹, И.Г. Вовнова¹, Ю.В. Соловьева¹, В.А. Старенченко¹

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Предложена многопараметрическая математическая модель, описывающая кинетику накопления деформационных дефектов с учетом фрагментирования и последующего формирования зерен при мегапластических деформациях металлических ГЦК-монокристаллов. В основу модели положены новые представления о процессах деформационного формирования субзеренной и зеренной структуры и их математическое описание. Приведена общая схема построения уравнений модели на основе известных фактов и некоторых допущений с разной степенью обоснованности. Параметры модели определяются комбинацией физических, статистических и геометрических факторов, а их интервальные оценки получены с применением геометрических и статистических методов. Построенная модель верифицируется путем сравнения данных моделирования с полученными из различных источников экспериментальными данными, такими как плотность дислокаций, концентрация вакансий, размер фрагментов, размер зерен, угол разориентировки и кривые упрочнения.

Ключевые слова: пластическая деформация, математическое моделирование, точечные дефекты, плотность дислокаций, плотность границ разориентации, размер зерен, размер фрагментов, сдвиговая деформация, внутреннее напряжение.

Введение

Теоретической основой для создания металлических материалов с высокими эксплуатационными свойствами может служить математическая модель кинетики накопления и эволюции деформационных дефектов, таких как дислокации, вакансии, межузельные атомы и границы разориентировки. При построении настоящей математической модели использовались частные модели генерации, взаимодействия и рекомбинации деформационных дефектов, полученные и развитые многими авторами [1–7], поэтому модель является синтезом современных знаний о формировании, эволюции и превращениях деформационных субструктур. Были использованы разнообразные методы оценки различных физических, геометрических и статистических факторов, которые позволяют найти числовые значения параметров модели и определить доверительные интервалы для этих параметров.

Настоящая работа посвящена исследованию формирования субструктур и механических свойств исходных монокристаллов с ГЦК-структурой при умеренных и мегапластических деформациях на основе предлагаемой математической модели. Достижение этой цели требует решения комплекса задач, включающих конструирование уравнений кинетики деформационных дефектов, оценку параметров модели, получение выражений для экспериментально измеряемых характеристик субструктур, а также проведение численных расчетов при определенных условиях деформирования.

Ввиду огромного разнообразия способов и условий деформирования, настоящее исследование ограничивается лишь одним сценарием из всего множества возможных комбинаций, характерным, на наш взгляд, для любого элемента сплошной среды металлического материала, в котором деформирующее воздействие создает напряжения, достаточные для начала сдвиговой пластической деформации и недостаточные для проявления других механизмов пластической деформации. Поэтому далее рассматривается только одноосная деформация монокристалла, ориентированного для множественного скольжения при комнатной температуре и постоянной скорости сдвиговой деформации.

Уравнения кинетики накопления границ разориентировки

Предполагается, что за некоторый промежуток времени дислокационный источник испускает серию из n дислокационных петель, которые останавливаются вследствие образования непреодолимых препятствий их движению. Винтовые сегменты петель при движении взаимодействуют с

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.121

DOI: 10.17223/00213411/66/8/5

**Лоренц-инвариантные формы движения
классической релятивистской частицы в 3+1-измерениях***Н.С. Акинцов^{1,2}, Г.Ф. Копытов³, А.П. Невечеря⁴, Юнцзе Ян^{5,6}¹ Наньтунский университет, г. Наньтун, КНР² Колледж физики и оптоэлектроники Океанического университета Китая, г. Циндао, КНР³ Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Россия⁴ Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия⁵ Школа информационных наук и технологий Наньтунского университета, г. Наньтун, КНР⁶ Наньтунский научно-исследовательский институт передовых коммуникационных технологий, г. Наньтун, КНР

На основе лоренц-инвариантной формы исследована динамика частицы в собственной инерциальной системе отсчета с применением геометрии Лобачевского. Рассмотрено расширение метрики Лоренца для 3+1-измерений. Получены инвариантные формы интегралов движения частицы, которые связаны с поперечной, продольной и угловой компонентами импульса частицы. Исследована динамика релятивистской частицы в зависимости от направления проекционного гировектора $\mathbf{s}$, который связан с гировектором нормали $\mathbf{n}$ и гировектором поляризации $\mathbf{k}$ через угловой интеграл движения θ . Введены новые метрические представления параметра ξ в зависимости от углового интеграла движения. Выведена гамильтонова и поперечная координаты релятивистской частицы. Найдена связь инвариантной формы между продольной и поперечной компонентами импульса частицы через угловой интеграл движения.

Ключевые слова: лоренц-инвариантная форма, интеграл движения, угловой интеграл движения, продольная и поперечная компоненты импульса частицы, гировектор.

Введение

Инвариантная форма описания движения и излучения релятивистской частицы необходима для понимания множества физических процессов. Так, фундаментальное предположение, лежащее в основе специальной теории относительности Эйнштейна, состоит в том, что физический интервал между двумя близлежащими событиями является инвариантом, имеющим одинаковые значения для всех инерциальных систем отсчета. Это предположение является естественным выводом, полученным из четырехмерного пространства Минковского. Тем не менее авторы данной работы считают, что постулаты Эйнштейна являются слишком ограниченными, чтобы включать в себя все возможные движения релятивистской частицы в собственной системе координат. В этой работе предложено альтернативное представление специальной теории относительности в 3+1-измерения на основе лоренц-инвариантных представлениях пространственно-временной координаты, выражающейся через интегралы движения.

Хотим заметить, что сама специальная теория относительности Эйнштейна подвергалась критике и модификации со стороны различных авторов [1, 2]. Например, Е.А. Милн [3] предлагает подход к теории относительности, который позволяет избежать неопределяемых концепций жестких измерительных стержней и периодических часов. Несмотря на преимущества подхода Е.А. Милна [3], Л. Пэйдж [4] считает, методы Е.А. Милна ошибочны в определенных отношениях,

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Минобрнауки РФ (проект № FZEN 2023-0006), частично поддержана проектом Наньтунского научно-технического плана (гранты № JC2020137 и JC2020138), ключевой программой исследований и разработок китайской провинции Цзянсу (грант № BE2021013-1), а также Национальным фондом естественных наук Китая, провинции Цзянсу (грант № BK20201438), и частично в рамках исследовательского проекта по естественным наукам высших учебных заведений провинции Цзянсу в рамках грантов 20KJA510002 и 20KJB510010.

**Реликтовое гравитационное поле волновой и неволновой природы
в геометродинамике Логунова***В.В. Ласуков¹¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В рамках геометродинамики Логунова найдены анизотропные решения уравнения Лагранжа, соответствующего метрике со скалярным и тензорным возмущением. На этой основе показано, что анизотропия реликтового электромагнитного излучения может нести информацию об эпохе повторного нагрева и инфляции при условии их существования. Найденные решения согласуются с аналогичными решениями в геометродинамике Эйнштейна.

Ключевые слова: реликтовое гравитационное поле, эпоха повторного нагрева, вакуумно-подобное гравитационное поле.

Введение

Согласно современным представлениям Вселенная прошла четыре эволюционные эпохи: инфляционную эру ($p = -\varepsilon$) [1–3] (А. Старобинский, А. Гут, А. Линде), эру доминирования радиации ($p = \frac{\varepsilon}{3}$), эру доминирования барионной материи ($p = 0$) и эру темной энергии [4–10]. Эпохе доминирования радиации предшествует короткая постинфляционная эпоха повторного нагрева за счет выгорания тяжелого вакуума, что и является Большим взрывом [11, 12].

Эра повторного нагрева является загадочной и пока не доступна для любого в настоящее время проходящего эксперимента. То же самое относится и к инфляционной эпохе. В будущем эксперименты с гравитационными волнами позволят исследовать эпоху повторного нагрева. В этой связи найдем анизотропное неволновое решение дифференциального уравнения Лагранжа, соответствующего метрике с изотропным возмущением, которое может нести информацию об эпохе повторного нагрева.

1. Анизотропное реликтовое гравитационное поле неволновой природы

Современная Вселенная с высокой точностью является пространственно-плоской. Поэтому рассмотрим возмущение не волновой природы плоской Вселенной. В релятивистской теории гравитации со связями Логунова постоянная k однородной и изотропной модернизированной метрики Логунова [13]

$$dS^2 = N^2 (dx^0)^2 - \left(\frac{a(x^0)}{a_0} \right)^2 dl^2, \quad dl^2 = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (\sin^2(\vartheta) d\psi^2 + d\vartheta^2) \quad (1)$$

определяется однозначно и равна нулю, что следует из полевых уравнений релятивистской теории гравитации Логунова $D_\mu \tilde{g}^{\mu\nu} = \partial_\mu \tilde{g}^{\mu\nu} + \gamma_{\sigma\mu}^\nu \tilde{g}^{\mu\sigma} = 0$, где $\tilde{g}_{\mu\nu} = \sqrt{-g} g_{\mu\nu}$, g – определитель метрического тензора $g_{\mu\nu}$ эффективного риманова пространства, $\gamma_{\sigma\mu}^\nu$ – символы Кристоффеля реального пространства Минковского. Действительно, для такой метрики уравнения связей Логунова принимают вид $\frac{\partial}{\partial x^0} \left[\frac{a^6}{N^2} \right] = 0$, $\frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \sqrt{1 - kr^2} \right] = \frac{2r}{\sqrt{1 - kr^2}}$, из которых следует, что $N^2 = \left(\frac{a}{a_0} \right)^6$, $k = 0$, т.е. $g_{00} = |g_{ik}|^3$. Так как в теории Логунова $k = 0$, то в ней отсутствует проблема плоскостности. Связь Логунова означает зависимость компонент метрического тензора g^{00} и g^{ik} , $i, k = 1, 2, 3$. Следует отметить, что для модернизированной метрики Логунова плоской Вселенной

* Исследование выполнено в рамках программы развития ТПУ.

Определение вероятностных параметров в системе нейтрино и антинейтрино

В.В. Скобелев¹

¹ *Московский политехнический университет, г. Москва, Россия*

С использованием некоторых результатов наших предыдущих работ вычислены вероятностные параметры, описывающие превращения $\nu_i \rightarrow \nu_j$, $\bar{\nu}_i \rightarrow \bar{\nu}_j$ ($i, j = e, \mu, \tau$; $i \neq j$), $\nu_i \leftrightarrow \bar{\nu}_j$ ($i, j = e, \mu, \tau$), происходящие с нарушением сохранения лептонных чисел нейтрино, а также диапазоны значений средних чисел ν и $\bar{\nu}$. Обсуждается также возможный вклад этих взаимопревращений в известный эффект дефицита солнечных электронных нейтрино.

Ключевые слова: вероятность, параметры, солнечные нейтрино, антинейтрино, дефицит.

Введение

В наших работах [1, 2] на основе предложенного подхода сформулированы принципы расчета относительных чисел частиц в системах атомов при значении с включением частного случая $z = 1$, введенного в основной по теме работе [1] вероятностного параметра z , а также как пролонгация результатов с возможностью расчета в системе нейтрино и (или) антинейтрино и в общем случае $z \neq 1$ [2, 3]. Интерес к данной проблеме связан со следующим обстоятельством.

Во второй половине прошлого века было обнаружено [4–10], что регистрируемый на Земле поток солнечных электронных нейтрино примерно в 2 раза меньше того, который должен быть, если учитывать их генерацию в центральных областях Солнца в рамках Стандартной модели. Это могло поставить под сомнение справедливость последней.

Принятое объяснение этого «дефицита» солнечных нейтрино основано на явлении осцилляций, т.е. взаимопревращений нейтрино разных поколений ν_e, ν_μ, ν_τ «друг в друга».

На эту принципиальную возможность, получившую название «осцилляций», впервые было указано в работе [11].

С другой стороны, в нашей работе [12] с использованием развитого в [1, 2] формализма было указано, что этот последний позволяет не только в принципе, а также и количественно объяснить «процентный дефицит» ($\approx 25 - 60\%$) от «теоретического») солнечных электронных нейтрино.

Развиваемый в этих наших работах формальный подход основан на естественном в рамках обычного курса квантовой механики [13, 14] предположении о существовании вероятностных переходов между различными состояниями нейтрино ν_i ($i = e, \mu, \tau$), причем, в отличие от общепринятой трактовки эффекта «осцилляций», существование у нейтрино ненулевой массы не является обязательным.

В рамках этого подхода одно из произвольно выбранных нейтринных состояний i считается базовым с относительным числом нейтрино E_3 в этом состоянии, а остальных двух – E_1 и E_2 , причем, по определению этого базового состояния, $E_3 > E_{1,2}$, где

$$E_i = N_i / N \left(N = \sum_i N_i = \text{const} \right). \quad (1)$$

В силу же абсолютного «равноправия» остальных двух по отношению к базовому должно выполняться условие $E_1 = E_2 \equiv E_{1,2}$, а в соответствии с (1) имеем тогда

$$2E_{1,2} + E_3 = 1. \quad (2)$$

В работе [3] (см. также [2]) в рамках более общего подхода с произвольным числом состояний N_S микрообъектов было указано, что при числе нейтринных состояний N_S больше трех, т.е. с включением, например, и трех состояний антинейтрино $\bar{\nu}_i$ ($i = e, \mu, \tau$), все шесть получающихся в этом случае «нейтринных» состояний также могут быть разбиты на три группы «с номерами 1, 2, 3»,

Анализ динамической структуры околоземного космического пространства с целью поиска орбит, пригодных для утилизации и паркинга отработавших ИСЗ*

И.В. Томилова¹, А.Г. Александрова¹, Н.А. Попандопуло¹,
Н.А. Кучерявченко¹, Е.В. Блинкова¹

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

Изложены результаты анализа динамической структуры околоземного космического пространства и каталогизированного космического мусора, представленного в каталоге NORAD, проведенного с целью поиска зон, пригодных для утилизации и паркинга. Приводятся оценки временных и энергетических затрат, необходимых для перехода отработавших космических аппаратов на предполагаемые орбиты утилизации или паркинга при помощи двигателя малой тяги.

Ключевые слова: орбиты утилизации, космический мусор, вековые резонансы, динамика искусственного спутника Земли, время жизни искусственного спутника Земли.

Введение

Околоземное космическое пространство (ОКП) с каждым годом становится все более технически загруженным. На данный момент по оценкам Европейского космического агентства (ESA) [1] в ближнем космосе находятся более 130 млн объектов искусственного происхождения более 1 мм в диаметре. С момента запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) по состоянию на март 2023 г. количество выведенных на орбиты ИСЗ составило 15 430 объектов, из которых 10 290 все еще находятся в ОКП, при этом всего 7600 аппаратов являются функционирующими. За время освоения ближнего космоса произошло более 640 фрагментаций околоземных объектов, что значительно увеличило их число. Как видно из приведенных цифр, действующие спутники составляют малый процент от всех искусственных околоземных объектов и большую часть представляет собой космический мусор. На данный момент на регулярной основе отслеживается порядка 33 тыс. объектов космического мусора.

В связи с этим в последние годы опасности со стороны космического мусора уделяется все возрастающее внимание [2–5]. Проводятся всевозможные исследования долговременной орбитальной эволюции таких объектов, поиск орбит захоронения [6–9].

Под орбитами захоронения будем понимать два типа орбит: утилизации и паркинга. В первом случае предполагается, что после размещения ИСЗ на орбиту происходит его полная утилизация под действием возмущающих сил, а во втором, что объекты просуществуют на орбите длительное время.

Был проведен анализ динамической структуры околоземного орбитального пространства и результатов исследования динамики каталогизированного космического мусора, представленного в каталоге NORAD [10] с целью выбора зон ОКП, пригодных для утилизации и паркинга.

1. Набор критериев пригодности зон для утилизации и паркинга

Исходя из понятий, данных для орбит утилизации и паркинга, были введены следующие критерии для таких орбит:

Орбиты утилизации

1) короткое время жизни ИСЗ на околоземной орбите, которое подразумевает полную утилизацию объекта за счет спуска в плотные слои атмосферы либо ухода из ОКП под действием возмущающих сил;

2) отсутствие пересечений с орбитами функционирующих ИСЗ, а также областями с максимальной пространственной плотностью космического мусора в долгосрочной перспективе, так как столкновения с объектами космического мусора могут изменить траекторию движения и привести

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10022, <https://rscf.ru/project/19-72-10022/>.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.933

DOI: 10.17223/00213411/66/8/9

Влияние эффекта Зеемана на процесс трехчастичной рекомбинации в ультрахолодной плазмеТ.Т. Муратов¹¹ *Ташкентский государственный педагогический университет им. Низами,
г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Анализируется влияние эффекта Зеемана на процесс трехчастичной рекомбинации электронов и ионов (протонов) в ультрахолодной водородной плазме $T = 1\text{--}20$ К. Указывается на необходимость учета зеемановского расщепления высоковозбужденных уровней для корректного описания каскадного канала рекомбинации в плазме в «сильном» магнитном поле. Получена асимптотическая формула для коэффициента трехчастичной рекомбинации в области сильных магнитных полей.

Ключевые слова: коэффициент трехчастичной рекомбинации, каскадный захват, ультрахолодная водородная плазма, эффект Зеемана.

Введение

В плотных ионизированных газах при низких температурах становятся существенными трехчастичные рекомбинации типа «электрон – электрон – ион» [1]. В результате тройного процесса образуется связанное состояние двух сталкивающихся частиц, третья частица уносит выделяемую при этом энергию ($A^+ + B^- + C \rightarrow AB + C$). Величину константы K данного процесса легко оценить. Частота превращения частицы B^- в AB по порядку величины есть произведение вероятности нахождения частицы B^- в критической области $r^{*3} n_{B^-}$ (n_{B^-} – плотность частиц B^- сорта, r^* – критический радиус) на частоту соударения с частицей третьего сорта $n_C v \sigma$. Здесь v – относительная скорость столкновения, σ – сечение соударения частицы C с частицей A^+ или B^- , в результате которого они обмениваются энергией порядка $k_B T$. Кинетическое уравнение процесса имеет вид

$$\frac{dn_{AB}}{dt} = K n_{A^+} n_{B^-} n_C, \quad (K \propto r^{*3} v \sigma). \quad (1)$$

Для коэффициента тройной рекомбинации электронов и ионов (атомов) ($2e^- + A^+ \rightarrow A + e^-$)

$$\alpha = K n_e \propto \frac{e^{10}}{\sqrt{m} (k_B T_e)^{9/2}}, \quad (2)$$

где m – масса электрона; e – элементарный заряд; n_e – концентрация электронов; T_e – температура невырожденного электронного газа плазмы.

Более точный расчет вместо (2) дает [1]:

$$\alpha \propto \frac{e^{10} \ln \Lambda}{\sqrt{m} (k_B T_e)^{9/2}}, \quad (3)$$

где $\ln \Lambda$ – кулоновский логарифм (порядка единицы).

В работе [2] было предложено выражение для коэффициента трехчастичной рекомбинации ультрахолодной водородной плазмы в «сильном» магнитном поле, которое имеет вид

$$\alpha_B / \alpha = (r_B / r_T)^2 \propto B^{-2}, \quad (4)$$

где α определяется выражением (3); $r_B = \sqrt{2E / m \omega_B^2}$ – ларморовский радиус; E – энергия электрона; $\omega_B = eB / mc$ – циклотронная частота; B – индукция магнитного поля; c – скорость света;

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.911

DOI: 10.17223/00213411/66/8/10

**Двумерные материалы на основе элементов групп VA и VIA:
методы получения и перспективы использования***

К.А. Лозовой¹, В.В. Дирко¹, А.П. Коханенко¹, О.И. Кукунов¹, А.С. Соколов¹,
Н.Ю. Акименко², К.И. Хомякова¹, Х. Диб¹, А.В. Войцеховский¹

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

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

Открытие и экспериментальное получение графена привлекло значительное внимание к изучению других новых одноэлементных двумерных материалов (трансграфенов) групп IIIA–VIA периодической системы. В данной работе рассматриваются двумерные аллотропные модификации одиночных элементов главных подгрупп V и VI групп: фосфорен (P), арсенен (As), антимонен (Sb), висмутен (Bi), селенен (Se) и теллурен (Te). Описываются структурные параметры и способы получения двумерных материалов на основе этих элементов. Особое внимание уделяется режимам их синтеза в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, обеспечивающим получение качественных бездефектных двумерных структур. Проводится обзор перспектив приборного применения всех графеноподобных 2D-материалов.

Ключевые слова: 2D-кристалл, фосфор, мышьяк, сурьма, висмут, селен, теллур, фосфорен, арсенен, антимонен, висмутен, селенен, теллурен, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Введение

Открытие и экспериментальное получение графена [1] привлекло значительное внимание к изучению других новых одноэлементных двумерных материалов (трансграфенов) групп IIIA–VIA. Они являются весьма перспективными с точки зрения создания наноустройств будущего, обладающих высоким быстродействием и повышенной эффективностью [2, 3]. В результате произошел лавинообразный скачок числа теоретических и экспериментальных работ, посвященных двумерным наноматериалам [4, 5]. Благодаря совместным усилиям экспериментаторов были синтезированы многие одноэлементные двумерные материалы: борофен (B), галленен (Ga), таллен (Tl), силицен (Si), германен (Ge), станен (Sn), плюмбен (Pb), фосфорен (P), арсенен (As), антимонен (Sb), висмутен (Bi), селенен (Se) и теллурен (Te) [6–8]. Огромное число работ посвящено уникальным свойствам 2D-материалов и перспективам их использования для создания устройств, основанных на абсолютно новых принципах работы [9, 10].

Теоретические исследования двумерных материалов группы VA предсказывают им полупроводниковые свойства с возможностью управления шириной запрещенной зоны. Среди других свойств двумерных материалов пятой группы следует выделить их низкие теплопроводность и электрическую проводимость. Кроме того, в некоторых из этих материалов ожидаются топологические свойства, появление при определенных условиях двумерных и одномерных топологически защищенных состояний. Вместе с очень хорошей стабильностью все эти свойства позволяют надеяться на разнообразие возможных применений подобных материалов в электронике, фотонике и других областях [11].

Двумерные материалы группы VIA выгодно отличаются от других 2D-материалов благодаря своим превосходным электрическим свойствам. Прогнозируемая высокая подвижность носителей двумерных материалов шестой группы позволяет надеяться на их широкое применение в различных устройствах. По сравнению с другими одноэлементными 2D-материалами двумерные селен и теллур обладают замечательной стабильностью, благодаря чему должны найти широкое применение в новейших приборах электроники и оптоэлектроники [12].

Настоящий обзор посвящен двумерным аллотропным модификациям элементов главных подгрупп V и VI групп периодической системы. Рассматриваются последние достижения в области

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

Диэлектрические свойства частиц речного песка в зависимости от их размеров и наличия глинистых примесей*

П.П. Бобров¹, Т.А. Беляева¹, Е.С. Крошка¹, О.В. Родионова¹

¹ Омский государственный педагогический университет, г. Омск, Россия

Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости частиц речного песка и стеклянных шариков с узкими диапазонами размеров частиц на частотах от 0.1 до 10 ГГц. Исследованы разные формулы диэлектрических смесей, с помощью которых найдена диэлектрическая проницаемость стекла и минерала песчаных частиц. Обнаружено, что при уменьшении размеров частиц песка диэлектрическая проницаемость в сухом и водонасыщенных состояниях возрастает. Основной причиной этого возрастания является наличие в мелких частицах глинистых примесей.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, формулы диэлектрических смесей, широкий диапазон частот, речной песок, стеклянные шарики.

Введение

Широкополосная диэлектрическая спектроскопия является перспективным методом исследования почв и горных пород. Многочастотные релаксационные процессы, вызванные межслойной поляризацией, оказывают определяющее влияние на комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) на частотах ниже 100 МГц в случае песчаных пород и на частотах ниже 2–5 ГГц в случае глинистых пород [1]. Интенсивность релаксационных процессов зависит от размеров частиц, объемной доли насыщающего раствора и его солёности. Как правило, интенсивности и частоты процессов релаксации возрастают при уменьшении размеров частиц и увеличении проводимости раствора [2, 3]. Определение параметров релаксационных процессов, влияющих на КДП в диапазоне частот от единиц килогерц до десятков и сотен мегагерц, позволяет связать их с размерами частиц (пор) и гидравлической проницаемостью [4, 5].

В водонасыщенных породах значительный вклад в КДП вносит высокочастотная составляющая спектра, определяемая ориентационной поляризацией молекул воды, и правильный учет этого вклада важен для определения параметров релаксационных процессов. На высоких частотах, где не проявляется влияние межфазного взаимодействия и релаксационные процессы отсутствуют, КДП породы зависит от КДП составляющих фаз и соотношения их объемных долей. Многочисленные исследования диэлектрических свойств рыхлых песчаных образцов и порошков стеклянных шариков показывают, что действительная часть КДП на частотах около 1 ГГц не зависит от размеров частиц в том случае, если образцы состоят из частиц одинаковых размеров [6–8]. В смесях, состоящих из частиц разных размеров, пространство вокруг крупных частиц вместо фоновой среды (жидкости или воздуха) частично заполняется мелкими частицами. Это приводит к уменьшению действительной части КДП на 3–4% в образцах, насыщенных водой, и увеличению примерно на 3% в сухих образцах.

Однако в реальных песчаных породах поры могут обладать широким спектром размеров, составляющие их фракции могут содержать частицы разного минералогического состава и иметь разные значения КДП.

Цель настоящей работы – установление влияния размеров частиц на КДП диэлектрических измерений и моделирования с помощью моделей смесей КДП сухих и полностью водонасыщенных образцов песка и порошков стеклянных гранул разных размеров.

1. Материалы и методы

Были исследованы сухие и водонасыщенные рассеянные с помощью сит фракции речного песка и стеклянных гранул сферической формы с узкими диапазонами размеров частиц. В качестве основного материала использовался речной песок, распределение частиц по размерам в котором показано на рис. 1, а. Около половины массы песка имеет размер частиц от 0.125 до 0.18 мм, и

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

Механизм нелинейной квантовой поляризации в протонных полупроводниках и диэлектриках

В.А. Калытка¹, М.В. Коровкин^{2,3}

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

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

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

Приведены результаты исследований квантовых статистических свойств протонной подсистемы в кристаллах с водородными связями (КВС). На основании нестационарного операторного уравнения Лиувилля (с учетом ряда установленных в эксперименте допущений) построено квантовое кинетическое уравнение для ансамбля невзаимодействующих протонов (идеальный протонный газ), двигающихся в потенциальном поле кристаллической решетки, возмущенной внешним электрическим полем. Равновесная матрица плотности для невозмущенной протонной подсистемы строится с помощью квантового канонического распределения Гиббса, а неравновесная матрица плотности вычисляется из решений нелинейного квантового кинетического уравнения методами теории возмущений в линейном приближении теории возмущений для модели блокирующих электродов. Полное квантово-механическое усреднение оператора поляризации позволяет исследовать теоретические частотно-температурные спектры комплексной диэлектрической проницаемости, вычисляемые с помощью квантовых релаксационных параметров, существенно отличающихся от их квазиклассических аналогов. Изложена схема аналитического исследования тангенса угла диэлектрических потерь в области квантовой нелинейной релаксации в КВС.

Ключевые слова: кристаллы с водородными связями, протонные полупроводники и диэлектрики, нелинейная квантовая диффузионная поляризация, квантовые релаксационные параметры, комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

Введение

В последние два десятилетия существенную роль в различных отраслях современной промышленности играют композиционные материалы на основе слоистых диэлектриков с ионно-молекулярной химической связью, способные проявлять в определенных диапазонах параметров полей и температур высокую ионную проводимость [1–5].

Отдельную категорию ионно-молекулярных диэлектриков представляют кристаллы с водородными связями (КВС), используемые в радиоэлектронике (элементы электронно-управляемых систем СВЧ-диапазона [6]); оптоэлектронике и нелинейной оптике (нелинейные преобразователи оптических сигналов, высокочастотные длинномодовые оптоволоконные датчики деформаций в твердотельных элементах конструкций и сооружений в горных и строительных технологиях); лазерной технике (регуляторы параметров излучения и электрические затворы (KDP)) [7–9]; микроэлектронике (полевые транзисторы, резонансные туннельные диоды, МДП-, МПМ-структуры); электрохимических технологиях (твердотельные топливные элементы на основе диэлектриков с высокой ионной проводимостью) [10–14].

Механизм спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках класса КВС (триглицинсульфат, сегнетова соль [15–23], KDP, DKDP [24–28] и др.) обусловлен, по результатам ряда исследований [25, 26, 28], квантовыми туннельными переходами (смещениями) ионов водорода (протонов) внутри водородной подрешетки вблизи точки фазового перехода второго рода.

Проявление у сегнетоэлектрических КВС прямоугольной петли гистерезиса с аномально большим временем релаксации остаточной поляризации (до 10 лет) позволяет использовать эти материалы в конденсаторах энергонезависимых быстродействующих запоминающих устройств (ячейки памяти типа DRAM, FeRAM и др.), электронно-вычислительных устройств [29–32].

Теоретические исследования нелинейных кинетических явлений при поляризации слоистых диэлектриков класса КВС (кристаллогидраты; слоистые силикаты) выполнены в широком диапазоне параметров полей и температур и указывают на проявление аномально высокой диэлектрической проницаемости (1.5–2.5 млн) в области сверхнизких температур (1–10 К) при слабых полях (100–1000 кВ/м) и в области сверхвысоких температур (550–1500 К) при сильных полях (10–100 МВ/м) [33–38].

В КВС в широком диапазоне параметров полей (0.1–100 МВ/м) и температур (1–1500 К) туннельные переходы протонов в анионной подрешетке играют существенную роль при формирова-

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.77

DOI: 10.17223/00213411/66/8/13

**Моделирование просветляющего покрытия на алмазе
путем изменения поверхностного рельефа***В.В. Чашин¹, Е.И. Липатов^{1,2}¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Создана модель просветляющего покрытия алмаза с измененным поверхностным рельефом. Рассчитана оптимальная геометрия просветляющей структуры, получены расчетные спектры отражения и пропускания для излучения видимого диапазона. Приведено сравнение спектров отражения и пропускания для алмаза с измененной поверхностью и без изменений.

Ключевые слова: алмаз, просветляющее покрытие, численное моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, в том числе высокой химической и радиационной стойкости и высокому показателю преломления, алмаз является перспективным материалом для использования в различных фотонных и оптических устройствах, например, в качестве лазерного активного элемента [1, 2]. Однако при использовании алмаза как активного элемента для лазера с оптической накачкой немаловажным фактом является именно его высокий показатель преломления. Так, на длине волны накачки $\lambda = 532$ нм, ввиду потерь на отражения, пропускание алмаза составляет порядка 83%, из-за чего необходимость его просветления становится актуальной. Ранее предлагалось использование многослойных покрытий на основе алмаза [3], однако использование подобных структур не решало проблемы высокого отражения излучения оптической накачки.

Схожая задача была рассмотрена в работах [4, 5], где также основной задачей являлось просветление алмазной пластины для длины волны $\lambda = 10.6$ мкм. Исходя из результатов этих работ была рассмотрена возможность масштабирования предложенных структур на длины волн видимого диапазона.

Целью представленной работы является расчет необходимых геометрических параметров просветляющей структуры на поверхности алмаза, их оптимизация и расчет спектров пропускания и отражения в диапазоне длин волн $\lambda = 350\text{--}1000$ нм с максимумом пропускания на $\lambda = 532$ нм.

Компьютерное моделирование

В представленной работе для построения и расчета просветляющей структуры использовался пакет COMSOL Multiphysics с установленным модулем Волновая Оптика для расчета взаимодействия электромагнитной волны заданных параметров с интересующей моделью. В основе расчетов лежит метод конечных элементов: построенная модель «разбивается» на сетку, от размеров которой зависит точность получаемых результатов. После построения сетки и настройки материалов, используемых в модели, происходит пошаговый расчет: в каждом узле полученной сетки программа решает уравнение взаимодействия электромагнитной волны с материалом.

Геометрия расчетной структуры показана на рис. 1 и представляет собой алмазную подложку (справа) с созданными на поверхности каналами. Форма канала приведена к равнобедренной трапеции с контролируемыми размерами оснований и расстоянием между каналами.

* Исследование было выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.

Математическая модель тактильного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным датчиком*

А.А. Паньков¹

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия*

Разработана оптико-механическая математическая модель функционирования тактильного (индикаторного) полимерного покрытия для диагностирования локации, величины или спектра сил квазистатических вдавливающих соответственно одиночной или множества однотипных жестких шаровых частиц в поверхность покрытия по результатам измерения (на входе/выходе оптического волокна) оптического спектра отражения встроенной внутрь в виде плоской спирали оптоволоконной брэгговской решетки. Установлено, что для случая вдавливания одиночной частицы искомые величины ее радиуса и силы вдавливания могут быть найдены из анализа последовательности информативных ярко выраженных максимумов в спектре продольных деформаций – решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода по измеренному спектру отражения оптического волокна. Для случая одновременного вдавливания множества однотипных частиц задача нахождения спектра сил сведена к последовательному решению двух задач (уравнений Фредгольма): первая – нахождение спектра деформаций по измеренному спектру отражения, вторая – нахождение искомого спектра сил по найденному ранее спектру деформаций. Представлены результаты численного моделирования спектров отражения и деформаций для одиночного и множественного вдавливания однотипных жестких шаровых частиц в поверхность тактильного покрытия.

Ключевые слова: тактильное покрытие, встроенный оптоволоконный датчик, длинная брэгговская решетка, диагностирование, спектр сил, вдавливание, жесткие шаровые частицы, численное моделирование.

Введение

Индикаторные тактильные покрытия являются важными элементами интерфейсов взаимодействия человека и компьютера, систем искусственного интеллекта, мониторинга здоровья, спорта, биомедицины, искусственной кожи роботов, имитирующей тактильные функции кожи человека, для зондирования и восприятия внешней среды, количественного определения локаций и величин таких ощущений, как сила, температура и влажность, наличие и идентификация химических веществ [1–7]. По принципу функционирования тактильные датчики основаны на различных, в частности, пьезорезистивных, емкостных, пьезоэлектрических, трибоэлектрических и оптических эффектах [8, 9]. Особое внимание при разработке тактильных датчиков (покрытий) уделяется повышению их многофункциональности, пространственного разрешения, чувствительности, автономности и визуальных возможностей.

Основными ограничениями пьезорезистивных датчиков, в которых удельное сопротивление изменяется при действии внешнего давления, являются низкая повторяемость, чувствительность к температуре и гистерезис [1]. В емкостных датчиках изменение его емкости зависит от величины внешнего давления, которое обуславливает изменение расстояния между пластинчатыми электродами датчика. Емкостные датчики имеют высокую чувствительность, низкое энергопотребление и возможность использования для протяженных поверхностей, недостатки – наличие паразитной емкости, чувствительность к шуму и сложные измерительные схемы [10]. Пьезоэлектрические датчики имеют высокую чувствительность и стабильность рабочих характеристик [11], но применимы для измерения лишь динамических механических (импульсных) воздействий, что обусловлено малостью характерного времени релаксации пьезоэлектрического заряда [12]. Трибоэлектрические датчики основаны на эффекте фрикционной электрификации материала, обладают высокой чувствительностью и (как и пьезоэлектрические датчики) автономной генерацией информативных электрических сигналов, но также как емкостные и пьезоэлектрические датчики очень чувствительны к внешним электрическим помехам [13]. Инвариантностью к внешним электрическим полям (помехам) обладают оптические датчики на основе оптических волокон, которые или сами являются чувствительными элементами, например, световодами со встроенными оптоволоконными брэгговскими решетками, элементами оптической рефлектометрии (OTDR, OFDR) или используются совместно с пьезоактивными и фоточувствительными элементами для создания,

* Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2023-0006).

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.911; 536.46

DOI: 10.17223/00213411/66/8/15

Получение высокоэнтروпийных композитов на основе Hf–Ti–Cr–FeV–N в режиме высокотемпературных экзотермических реакций*Н.С. Евсеев^{1,2}, А.Е. Матвеев¹, И.А. Бельчиков¹, И.А. Жуков^{1,2}, А.Б. Ворожцов¹, Р.Г. Мубараков¹¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия²Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия

Показана принципиальная возможность получения высокоэнтропийного керамического композиционного материала системы Hf–Ti–Fe–V–Cr–N в режиме высокотемпературных экзотермических реакций. Предложен вероятный механизм образования композиционного материала (Hf, Ti, Cr, Fe, V)N – (Ti, Hf)N.

Ключевые слова: высокоэнтропийная керамика, экзотермические реакции, фазовый состав, композиционные материалы.

Последние десятилетия внимание материаловедов все чаще направлено на изучение высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) и керамических материалов (ВЭК) [1], а также на поиск оптимальных способов их получения [2]. Такой интерес обусловлен тем, что благодаря сильному искажению решетки высокоэнтропийные материалы способны превзойти свои традиционные (двух- и трехкомпонентные) аналоги по ряду физико-механических свойств. Кроме того, одной из важнейших задач в этой области является поиск систем, сочетание элементов в которых позволит улучшить те физико-механические свойства, которые необходимы для решения конкретной задачи. К настоящему моменту ВЭС- и ВЭК-системы на основе тугоплавких металлов (Nb, Mo, Hf, Ta, W) изучены мало, при этом интерес к сплавам с элементами Hf–Ti проявляется все чаще [1, 3, 4]. Существуют различные методы получения ВЭС и ВЭК, при этом наиболее часто применимыми являются методы электродугового и индукционного плавления, а также селективное лазерное выращивание. В то же время одним из перспективных способов получения ВЭС/ВЭК является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) за счет высокотемпературных экзотермических реакций.

В настоящей работе исходные элементы шихты выбраны исходя из следующих соображений. С одной стороны, титан и гафний хорошо взаимодействуют между собой и представляют достаточно известную бинарную систему. Гафний химически и структурно близок к титану и имеет с ним неограниченную растворимость как в α -, так и в β -модификациях [5]. С другой стороны, элементы железа, ванадия и хрома имеют близкие атомные радиусы и электроотрицательности. Таким образом, для таких элементов выполняются размерный и электрохимический факторы Юм-Розери, что может благоприятно сказаться на формировании раствора с ОЦК- или ГЦК-решеткой, что может составить основу ВЭС/ВЭК [6]. Одновременно с этим элементы системы Hf–Ti–Fe–V–Cr имеют достаточно высокую температуру плавления, что, по предположению, позволит получить материал с высокими жаропрочными характеристиками. Третьим фактором выбора таких металлических элементов является их высокотемпературная экзотермическая реакция с азотом, в процессе которой выделяется большое количество тепловой энергии.

В качестве исходных компонентов смеси были использованы порошки гафния (дисперсность ≤ 200 мкм, чистота ≥ 99), титана (≤ 280 мкм, чистота ≥ 99), хрома (≤ 50 мкм, чистота ≥ 99) и феррованадия (≤ 200 мкм, чистота ≥ 98) с содержанием ванадия 52.2%. Горение исследуемой порошковой смеси осуществлялось в среде азота (чистота 99.99%). Исходные компоненты смешивались согласно стехиометрическому соотношению (Hf_{0.25}Ti_{0.25}Cr_{0.25}(FeV)_{0.25}) N: 53.7 мас.% Hf + 14.5 мас.% Ti + 15.7 мас.% Cr + 16.1 мас.% FeV.

Далее проводилась механическая активация исследуемой смеси в планетарной мельнице в течение 120 мин при частоте вращения 14 Гц в среде аргона. Из полученной порошковой смеси методом холодного одноосного прессования готовились образцы массой 40 г и диаметром 23 мм. Давление прессования составляло 35 МПа. Далее образцы помещались в реактор высокого давления. В качестве поджигающего слоя был использован титан марки ПТС-1. Верхняя часть шихты приводилась в контакт с электрической спиралью. Производилось вакуумирование и наполнение азотом до давления 4.0 МПа.

Температура синтеза измерялась при помощи вольфрам-рениевых термопар WR 5/20 диаметром 0.5 мм, введенных в центр исследуемого образца. Рентгенофазовый анализ продуктов синтеза проводили на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 с CuK α -излучением на основе базы данных PDF4+. Микроструктуру продуктов синтеза определяли с помощью электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00144.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 8

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 21.08.2023. Выпуск в свет 23.08.2023. Заказ № 5555.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.58. Уч.-изд. л. 17.45. 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

