

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

4·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Апрель, 2024

№ 4 (797)

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 ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Игнатьев Ю.Г., Самигуллина А.Р. Исследование полной модели космологической эволюции классического скалярного поля с Хиггсовым потенциалом. IV. Масштабные преобразования модели5

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Митрофанов А.Ю., Ильякова Н.Н., Руссаков Д.М., Тупицын А.В., Дягилев Д.В., Адуев Б.П. Оксид молибдена (VI) как фотохимический сенситизатор оптического зажигания энергетических материалов20
- Коровин Е.Ю., Качалов А.С., Гладков Ю.Н., Суслиев В.И. Исследование структурных и электромагнитных свойств композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок для целей электромагнитной совместимости29
- Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Влияние конической головной части цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама на высокоскоростное взаимодействие со стальной преградой35
- Попова Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Серебрякова А.А., Перегудов О.А., Жиркова Е.Н. Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура рельсов из заэвтектоидной стали после эксплуатации40
- Бобуёк С., Суржиков А.П., Николаев Е.В., Власов В.А., Лысенко Е.Н. Влияние механического измельчения на структуру и магнитный фазовый переход никель-цинковых феррошпинелей51

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Ферромагнитный нитрид галлия, легированный примесями редкоземельных элементов, в качестве материала для спинтроники59

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Безлепкина Н.П., Чайковская О.Н., Бочарникова Е.Н., Соломонов В.И., Макарова А.С. Исследование трансформации хлорамфеникола под действием УФ-излучения и электронного пучка73
- Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Формирование преломленной и отраженной электромагнитных волн метаповерхностями Панчаратнама – Берри с точки зрения молекулярной оптики84
- Халитов К.Ф., Халитов Ф.Г. Дипольные и квадрупольные моменты ионов Э^{3-} молекул ЭХ_3 в кристаллическом и газообразном состояниях91
- Алексеев С.В., Лосев В.Ф. Отработка методов измерения расходимости излучения в лазерной системе THL-100101

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Гладков С.О. К вопросу обобщения формулы Стокса106

CONTENTS

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Ignat'ev Yu.G., Samigullina A.R.** Study of the complete model of cosmological evolution of classical scalar field with Higgs potential. IV. Scale model transformations 5

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Mitrofanov A.Y., Ilyakova N.N., Russakov D.M., Tupitsyn A.V., Dyagilev D.V., Aduiev B.P.** Molybdenum (VI) oxide as a photochemical sensitizer of optical ignition of energetic materials..... 20
- Korovin E.Yu., Kachalov A.S., Gladkov Yu.N., Suslyayev V.I.** Study of structural and electromagnetic properties of composite materials based on carbon nanotubes for electromagnetic compatibility 29
- Sammel A.Yu., Skosyrsky A.B., Burkin V.V., Dyachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Kudryavtsev V.A., Stepanov E.Y., Chupashev A.V.** Influence of the conical head of cylindrical tungsten-based heavy alloy impactors on high-speed interaction with a metal barrier 35
- Popova N.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Porfiriev M.A., Serebryakova A.A., Peregudov O.A., Zhirkova E.N.** Structural-phase states and dislocation substructure of hypereutectoid steel rails after operation..... 40
- Bobuyok S., Surzhikov A.P., Nikolaev E.V., Vlasov V.A., Lysenko E.N.** Effect of mechanical grinding on the structure and magnetic phase transition of nickel-zinc ferrosipnls 51

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Khludkov S.S., Prudaev I.A., Tolbanov O.P., Ivonin I.V.** Ferromagnetic gallium nitride doped with impurities of rare earth elements as a material for spintronics 59

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Bezlepina N.P., Tchaikovskaya O.N., Bocharnikova E.N., Solomonov V.I., Makarova A.S.** Chloramphenicol transformation under the influence of UV and E-beam irradiation 73
- Averbukh B.B., Averbukh I.B.** Formation of refracted and reflected electromagnetic waves by the meta-surfaces of Pancharatnama – Berry from the point of view of molecular optics 84
- Khalitov K.F., Khalitov F.G.** Dipole and quadrupole moments of E^{3-} ions of EX_3 molecules in crystalline and gaseous states..... 91
- Alekseev S.V., Losev V.F.** Development of methods for measuring radiation divergence in THL-100 laser system 101

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Gladkov S.O.** On the topic of generalization of the Stokes formula..... 106

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 530.12:531.51:519.711.3

DOI: 10.17223/00213411/67/4/1

**Исследование полной модели космологической эволюции
классического скалярного поля с Хиггсовым потенциалом.
IV. Масштабные преобразования модели***Ю.Г. Игнатъев¹, А.Р. Самигуллина¹¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Проведены исследование и численное моделирование космологической эволюции классического скалярного поля с Хиггсовым потенциалом. На основе сформулированных свойств подобия космологических моделей исследованы их основные характеристики для моделей с различными масштабами взаимодействий: планковского масштаба, масштаба Великого объединения и масштаба Стандартной модели. На основе численного интегрирования с высокой точностью доказаны свойства подобия этих моделей.

Ключевые слова: космологические модели, Хиггсовы поля, гиперповерхности Эйнштейна – Хиггса, свойства подобия динамических систем, численное моделирование.

Введение

Как известно, Хиггсовы скалярные поля [1] были введены в физику элементарных частиц в связи с развитием так называемой Стандартной модели (см., например, [2]), которая была экспериментально подтверждена на адронном коллайдере [3]. В свою очередь, в космологию скалярные поля были введены в 80-х гг. XX столетия в связи с необходимостью объяснения инфляционного расширения Вселенной (см., например, [4]). В работе [5] был проведен анализ модели Вселенной, основанной на классическом скалярном поле с квадратичным потенциалом $V(\Phi) = 1/2 \cdot m^2 \Phi^2$ с помощью методов качественной теории динамических систем (см., например, [6]). В работе [7] был проведен аналогичный анализ для двухкомпонентной космологической модели, состоящей из скалярного поля и нейтральной идеальной жидкости.

В дальнейшем было проведено множество исследований по качественному и численному анализу космологических моделей с различными формами потенциальной энергии $V(\Phi)$. К сожалению, основная масса этих работ преследовала цель получения точных решений уравнений Эйнштейна, соответственно которой и подбиралась форма потенциальной энергии, зачастую не связанная с конкретными теоретико-полевыми моделями элементарных частиц. В работе [8] был проведен качественный и численный анализ космологической модели, основанной на классическом скалярном поле Хиггса. В этой работе были обнаружены и исследованы особенности поведения космологических моделей в зависимости от значений их фундаментальных параметров. К сожалению, технические трудности не позволили провести полноценное численное моделирование для реальных значений этих параметров. В [9] был доказан ряд свойств математических моделей, основанных на скалярных полях и заряженных фермионах, по отношению к преобразованию подобия, позволяющих распространять результаты численного моделирования с одной модели на другую, подобную ей. В настоящей работе на основе инвариантных свойств подобия мы проведем более полное исследование моделей с реальными значениями фундаментальных параметров.

* The work is carried out in accordance with the Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030» of the Kazan Federal University of the Government of the Russian Federation.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 544.536

DOI: 10.17223/00213411/67/4/2

**Оксид молибдена (VI) как фотохимический сенсibilизатор
оптического зажигания энергетических материалов***А.Ю. Митрофанов¹, Н.Н. Ильякова², Д.М. Руссаков²,
А.В. Тупицын², Д.В. Дягилев², Б.П. Адуев¹¹ *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия*² *Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия*

Определены критические плотности энергии инициирования взрыва ($H_{кр}$) поликристаллических прессованных таблеток композитов пентаэритриттетранитрата (тэна) и оксида молибдена (VI) (MoO_3) при воздействии излучения основной частоты (1064 нм) и второй гармоники (532 нм) импульсного Nd:YAG-лазера. В качестве сенсibilизаторов тэна к лазерному излучению использовались механически измельченные порошки MoO_3 микронного размера. Добавка оксида молибдена (1 мас.%) снижает $H_{кр}$ лазерным излучением с длиной волны 1064 нм лишь на несколько десятков процентов, хотя длина волны соответствует области поглощения центров окраски оксида молибдена. В то же время для видимого излучения с длиной волны 532 нм величина $H_{кр}$ снижается примерно в 3 раза. Эта длина волны соответствует области спектра с наименьшим показателем поглощения порошков MoO_3 . В этом случае снижение $H_{кр}$ нельзя объяснить воспламенением композита по механизму «горячих точек». Наиболее вероятным механизмом зажигания является фотохимическое разложение тэна, обусловленное нелинейным поглощением излучения MoO_3 . Этот результат нарушает жесткую связь между показателем поглощения материала и его эффективностью в повышении чувствительности энергетического материала к лазерному излучению.

Ключевые слова: лазерное зажигание, тетранитрат пентаэритрита, оксид молибдена (VI), фотохимия, УФ/видимая спектроскопия.

Введение

Лазерное излучение является удобным средством инициирования процессов в материалах для широкого круга задач от медицины до лазерной литографии. Одной из прикладных задач является инициирование горения или взрыва энергетических материалов [1–4]. Легкость управления лазерной генерацией, помехоустойчивость и импульсный характер воздействия являются преимуществами, стимулирующими интерес к исследованию и разработке оптических иницирующих систем энергетических материалов. Наряду с работами, рассматривающими лазерное излучение лишь как эффективный способ передачи тепловой энергии энергетическому материалу [5–12], в последние несколько лет появилось заметное количество исследований, посвященных фотохимическим процессам как триггеру горения или взрывного процесса [13–18]. Эти подходы обычно основаны на фотовозбуждении энергетического материала или фотосенсибилизирующей добавки, приводящем к самоподдерживающимся экзотермическим химическим реакциям разложения энергетических материалов без дополнительного нагрева и подвода энергии ударной волны.

В качестве фотосенсибилизатора можно использовать частицы оксида металла, например оксида магния или оксида цинка, как показано в [19–21]. При этом в случае оксида магния показано [22], что инициатором реакции разложения тэна может являться образование метастабильного анион-радикала в результате фотоиндуцированного переноса заряда от оксида магния к адсорбированной молекуле тэна, что приводит к его разложению и запуску реакции взрывчатого разложения. Этот процесс с добавлением оксида магния наблюдался только для ультрафиолетового излучения третьей гармоники Nd:YAG-лазера (355 нм), а в видимом излучении 532 нм почти не проявлялся. В то же время для промышленных целей и доставки излучения к энергетическому материалу по оптическому волокну более применимо использование излучения в видимой или инфракрасной области спектра. В настоящей работе обсуждается применение триоксида молибдена

* Работа выполнена в рамках гос. задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (проект 121031500513-4, руководитель Адуев Б.П.) и проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: проект FZSR-2020-0007.

Исследование структурных и электромагнитных свойств композиционных материалов на основе углеродных нанотрубок для целей электромагнитной совместимости*

Е.Ю. Коровин¹, А.С. Качалов¹, Ю.Н. Гладков^{1,2}, В.И. Сусляев¹

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

² *АО «НПЦ «ПОЛЮС», г. Томск, Россия*

Показана возможность применения композиционных эластомеров для обеспечения электромагнитной герметизации высокочастотной радиоэлектронной аппаратуры. Приведены результаты исследования спектров комплексных значений диэлектрической проницаемости эластомеров на основе многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в зависимости от концентрации на СВЧ. Показано, что увеличение концентрации МУНТ приводит к монотонному росту действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости. Проведено моделирование влияния величины технологического зазора на электромагнитную герметизацию блока высокочастотной аппаратуры в среде программного обеспечения CST STUDIO SUITE.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, электромагнитная герметизация, многослойные углеродные нанотрубки, моделирование, эластомеры, сверхвысокие частоты.

Введение

В современной технологии производства радиоаппаратуры специального и бытового назначения активно используются высокочастотные диапазоны электромагнитного излучения. Продвижение в высокочастотную область увеличило быстродействие обработки и передачи информации, расширило функциональные возможности аппаратных средств, но при этом выросла концентрация радиокомпонент на единицу площади и, как следствие, обострилась проблема электромагнитной совместимости. Миниатюризация аппаратуры и высокая рабочая частота привели к возникновению несанкционированных связей между функционально не связанными блоками. Не учитываемая на низких частотах излучательная способность проводников с ростом частоты существенно возрастает. Высокочастотное излучение «просачивается» через разъемы и технологические отверстия в экранах и корпусах приборов. Совокупный эффект излучения и «просачивания» снижает качественные показатели приема-передачи и преобразования сигнала, приводит к росту внутренних электромагнитных помех и может привести к нарушению функционирования изготовленной продукции.

Проблема паразитного влияния отдельных блоков не нова, с этой проблемой успешно справляются на низких частотах, используя экранирование металлическими конструкциями, фильтрующими элементами в электронных схемах приборов. Для экранировки применяются сплошные экраны на основе стальных, медных, алюминиевых и магниевых сплавов, а также сетчатые [1, 2]. С ростом рабочей частоты проявились проблемы, связанные с необходимостью нарушения целостности экранов и корпусов приборов для размещения разъемов, вентиляционных отверстий, прокладки сетевых и информационных кабелей, для съемных крышек. Появление зазоров и щелей связано также с несовершенством механической обработки и с наличием, например, антикоррозийного покрытия магниевых сплавов, толщина которого может составлять 20–30 мкм.

Для решения задач электромагнитной совместимости, связанных с наличием технологических зазоров и щелей, применяют проводящие эластомеры, в которых в качестве активного компонента используются материалы с высокой удельной проводимостью, например, порошки пористой меди [3], проводящие нити [4] или композиты на основе графена [5]. Аналитический обзор литературных источников и рыночных предложений показал, что нет однозначно выбранного материала для решения указанной проблемы электромагнитной совместимости: большой вес, недостаточная эластичность, высокая стоимость.

Цель данной работы – разработка материала для обеспечения электромагнитной герметизации блоков высокочастотной аппаратуры с варьируемым уровнем электромагнитной экранировки,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00686, <https://rscf.ru/project/23-29-00686/>.

Влияние конической головной части цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама на высокоскоростное взаимодействие со стальной преградой*

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

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

Экспериментальным методом исследовано влияние угла раствора конической головной части цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама на проникающую способность при высокоскоростном взаимодействии со стальной преградой в диапазоне скоростей 700–800 м/с.

Ключевые слова: тяжелые сплавы, композиционные материалы, ударник, высокоскоростное взаимодействие.

Введение

Тяжелые сплавы на основе вольфрама представляют собой класс композитов, состоящих из зерен вольфрама и пластичной связки, которые обладают уникальной комбинацией физико-механических и функциональных свойств (высоким модулем упругости, коррозионной стойкостью, высокой плотностью, радиационной стойкостью и т.д.). Обладая таким спектром свойств, эти материалы получили достаточно широкое распространение во многих областях промышленности, в том числе и оборонной [1]. Кроме этого до сих пор данные сплавы представляют большой интерес с точки зрения их приложений, в качестве объектов для исследования высокоскоростного взаимодействия [2–11]. Например, в работе [12] было выявлено, что при скорости взаимодействия в диапазоне 1200–1300 м/с наличие у ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама конической головной части дает прирост по глубине проникания в пределах 13% относительно ударника из того же сплава с плоской головной частью. Настоящая работа является логическим продолжением цикла работ [12, 13], направленных на выявление основополагающих параметров, которые в значительной степени будут влиять на процесс высокоскоростного взаимодействия композиционных материалов на основе вольфрама. Поэтому цель исследования – влияние угла раствора конической головной части цилиндрических ударников из тяжелого сплава на основе вольфрама на проникающую способность при высокоскоростном взаимодействии со стальной преградой в диапазоне скоростей 700–800 м/с.

Материалы и методика исследований

В качестве исходного материала использовали промышленный тяжелый сплав на основе вольфрама, из которого изготавливались ударники с конической головной частью цилиндрической формы. В качестве преграды-свидетеля использовалась стальная плита средней твердости толщиной 45 мм. Исследование высокоскоростного взаимодействия цилиндрических ударников из данного сплава проводилось на испытательной установке в диапазоне скоростей 700–800 м/с. Фиксация процесса высокоскоростного взаимодействия реализовывалась с применением высокоскоростной камеры Phantom v711.

Результаты экспериментальных исследований

Для исследования влияния угла раствора конуса головной части ударников на проникающую способность в стальную преграду были изготовлены цилиндрические ударники диаметром 6 мм одинаковой массы с углом раствора конуса головной части $\alpha = 45, 60, 90^\circ$, а также ударники с плоской головной частью (угол $\alpha = 180^\circ$). На рис. 1 представлен вид ударников, подготовленных к высокоскоростным испытаниям.

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

Структурно-фазовые состояния и дислокационная субструктура рельсов из заэвтектоидной стали после эксплуатации*

Н.А. Попова¹, В.Е. Громов², Ю.Ф. Иванов³, М.А. Порфирьев²,
А.А. Серебрякова², О.А. Перегудов⁴, Е.Н. Жиркова²

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

⁴ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

С помощью методов просвечивающей дифракционной электронной микроскопии выполнен количественный анализ эволюции фазового состава и тонкой структуры по радиусу скругления выкружки головки рельса из заэвтектоидной стали марки Э90ХАФ после эксплуатации на Забайкальской железной дороге. Исследования выполнены на расстояниях 0 (верхний слой контактной поверхности «колесо – рельс»), 2 и 10 мм. Проведен анализ тонкой структуры, размеров и плотности распределения карбидных частиц, скалярной и избыточной плотности дислокаций, кривизны-кручения кристаллической решетки, амплитуды внутренних напряжений. Определены источники внутренних напряжений и выявлены места зарождения микротрещин.

Ключевые слова: заэвтектоидная сталь, выкружка, морфологическая составляющая, фазовый состав, дислокационная субструктура, объемная доля, плотность дислокаций, внутренние напряжения.

Введение

Одной из актуальных задач современного физического материаловедения является анализ процессов, протекающих в рельсах при эксплуатации и способствующих ухудшению механических свойств [1–5]. Установление природы эволюции структурно-фазовых состояний рельсов определяется как фундаментальностью проблемы, так и ее практической значимостью. Безопасность железнодорожного транспорта в современных условиях возрастания интенсивности и скоростей движения во многом зависит от износа и усталостных повреждений [6–10]. Вопросы сопротивления усталости и износу являются предметом тщательного рассмотрения с точки зрения как научных исследований, так и опытно-конструкторских и технологических разработок. Анализ причин износа и деградации свойств рельсов при эксплуатации, выполненный в работах последних двух десятилетий, свидетельствует о многофакторности характера природы упрочнения поверхности катания рельсов [11–16].

Длительная эксплуатация рельсов сопровождается формированием градиентных поверхностных структур, накоплением плотности дислокаций, высокой микротвердостью, образованием «белого» слоя и протеканием других негативных процессов, способных привести к выходу рельсов из строя [17–22]. Проблемы износа и контактной усталости усугубляются при эксплуатации рельсов в реальных экстремальных условиях низких температур, высоких нагрузок на ось, малых радиусов железнодорожных кривых. В последние годы были разработаны материалы для рельсов с хорошим комплексом механических свойств за счет увеличения содержания углерода до заэвтектоидного уровня [23–27]. Рельсы из заэвтектоидной стали имеют меньшее межпластинчатое расстояние, поверхностные слои обладают субзеренной структурой с более высоким содержанием малоугловых границ зерен и почти не содержат цементита по границам.

В России с 2018 г. производят 100-метровые дифференцированно закаленные рельсы из заэвтектоидной стали Э90ХАФ категории ДТ 400 ИК повышенной износостойкости и контактной выносливости, предназначенные для эксплуатации в прямых участках железнодорожного пути со скоростями движения до 200 км/ч и кривых участках железнодорожного пути без ограничений по грузонапряженности.

Несмотря на многочисленные исследования поведения рельсов при повреждении [28–33], отсутствует надежная корреляция с условиями эксплуатации, особенно для высоконагруженных рельсов и малых радиусов железнодорожных кривых. Представленные описания микроструктуры

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

Влияние механического измельчения на структуру и магнитный фазовый переход никель-цинковых феррошпинелей *

С. Бобуёк¹, А.П. Суржиков¹, Е.В. Николаев¹, В.А. Власов¹, Е.Н. Лысенко¹

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

Методами рентгенофазового и термомагнитометрического анализов проведено исследование влияния механического измельчения синтезированных по керамической технологии никель-цинковых ферритовых порошков на их структуру и магнитофазовый переход в области температуры Кюри. Контролируемый набор значений областей когерентного рассеяния и микронапряжений в ферритовых порошках был получен в результате их обработки в шаровой мельнице при частоте оборотов размольной гарнитуры 500, 1000, 1500 об/мин в течение 15, 30 и 60 мин. Установлены корреляционные связи данных микроструктурных параметров с параметрами магнитного фазового перехода (температурный интервал и аппаратное изменение веса порошка в области температуры Кюри), полученными с помощью обработки термограмм при нагреве и охлаждении в печи термического анализатора. Показано, что наличие данных корреляционных связей может быть использовано для контроля состояния никель-цинковых порошков при производстве ферритов.

Ключевые слова: магнитный фазовый переход, термомагнитометрия, рентгенофазовый анализ, никель-цинковый феррит, керамический метод синтеза.

Введение

Никель-цинковые ферриты (НЦФ) относятся к магнитомягким керамическим материалам. Вследствие удачного сочетания электрических и магнитных свойств такие ферриты широко применяются в электронике [1], СВЧ-технике [2], чувствительных элементах датчиков [3–5], экранирующих покрытиях [6], магнитореологических жидкостях [7], транспортировке лекарственных средств [8] и т.д. Для каждой области их применения требуются ферриты с определенными структурными параметрами, включая магнитные порошки с заданным размером частиц. Для этого часто применяют методы механического измельчения порошков в шаровых мельницах с целью получения частиц с различной дисперсностью. При этом важно контролировать изменение не только структурных параметров обрабатываемых ферритов, но и их магнитные характеристики. Большинство исследований, посвященных изучению влияния микроструктуры на магнитные свойства ферритов, ограничиваются исследованием их гистерезиса. Например, как показано в работе [8], коэрцитивная сила ферритовых порошков состава $\text{Ni}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ менялась от 22 до 36 Э в зависимости от среднего размера частиц, который варьировался в диапазоне 0.3–1.5 мкм. В то же время влияние микроструктуры никель-цинковых ферритов на магнитный фазовый переход в точке Кюри изучено весьма слабо. При этом важно принимать во внимание, что температура Кюри ферритов может существенно измениться при уменьшении размера частиц до ультра- или нанодиапазона.

Существуют несколько классических методов определения точки Кюри: по величине температурного коэффициента электрического сопротивления, по температурной зависимости магнитной проницаемости [9] и т.д. Особый интерес представляет метод термомагнитометрии (ТМ) [10], который представляет собой термогравиметрию в постоянном магнитном поле. При ТМ анализируется форма кривой изменения веса магнитного образца от температуры. Эффективность метода ТМ при исследовании ферро- и ферримангнитных соединений была показана в работах [11–19]. Достоинство данного метода заключается в том, что он позволяет более четко определить как точку Кюри, так и в целом температурный диапазон перехода «ферримангнетик $\rightleftharpoons$ парамагнетик». При реализации метода ТМ форма образца не имеет значения и при измерении возможно использовать порошок в малом количестве, что очень удобно в случае анализа механически измельченных порошков.

Цель настоящей работы – исследование влияния механического измельчения никель-цинковых ферритовых порошков на магнитофазовый переход в точке Кюри и определение корреляционных связей результатов ТМ-измерений со структурными характеристиками исследуемых магнитных материалов.

* Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-72-10078-П.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.382.2

DOI: 10.17223/00213411/67/4/7

**Ферромагнитный нитрид галлия,
легированный примесями редкоземельных элементов,
в качестве материала для спинтроники***С.С. Хлудков¹, И.А. Прудаев¹, О.П. Толбанов¹, И.В. Ивонин¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приведен обзор литературы по магнитным свойствам нитрида галлия, легированного редкоземельными элементами (РЗЭ). Рассмотрены свойства GaN, легированного РЗЭ в процессе роста слоев методом молекулярно-лучевой и могиридной эпитаксии, а также в процессе ионного легирования. Пленки GaN, легированные редкоземельными элементами, как правило, приобретают ферромагнитные свойства с температурой Кюри выше комнатной.

Ключевые слова: нитрид галлия, ферромагнитные свойства, примеси редкоземельных элементов.

Введение

В настоящее время GaN является одним из наиболее важных полупроводниковых материалов микроэлектроники и широко используется, главным образом, в оптоэлектронике. В последнее время большое внимание уделяется изучению GaN, легированного магнитными примесями – разбавленного магнитного полупроводника (DMS), как материала, перспективного для спинтроники. Это обусловлено тем, что структуры на основе GaN обладают ферромагнитными свойствами с высокой температурой Кюри, поэтому можно применять уже существующую технологию изготовления гетероструктур для оптоэлектронных и электронных приборов. Исследованию GaN, легированного примесями редкоземельных элементов, посвящено значительное число как теоретических, так и экспериментальных работ.

В настоящем обзоре представлены материалы по получению и исследованию магнитных свойств GaN, легированного примесями редкоземельных элементов, и перспективам использования его в качестве материала для спинтроники.

**1. Теоретические исследования GaN,
легированного редкоземельными элементами**

Теоретические исследования нитрида галлия, легированного только гадолинием или Gd с одновременным легированием другими элементами, проведены несколькими группами [1–9].

Расчеты, проведенные в [1], показали, что спаривание атомов Gd в $Ga_{1-x}Gd_xN$ приводит к антиферромагнитному состоянию в отсутствие доноров в системе. При достаточной концентрации доноров образуется ферромагнитное состояние. В результате расчета по теории функциональной плотности магнитных свойств GaN, легированного Gd, установлено, что в процессе легирования Gd происходит образование большого количества Ga-вакансий с магнитным моментом 3 мкБор, что приводит к гигантскому магнитному моменту на атом Ga. Ферромагнетизм создают не непосредственно атомы Ga, а катионные вакансии [2].

По данным теоретических исследований, GaN со структурой вюртцита в результате одновременного легирования Gd и углеродом (C) приобретает ферромагнитные свойства [3]. Увеличение концентрации углерода в $GaGdN$ приводит к увеличению магнитного момента системы. Ферромагнетизм GaN, легированного одновременно Gd и C, объясняют за счет механизма $p-d$ -обмена по Зинеру. Отмечают, что значительную роль играют вакансии. При этом на магнитный момент больше влияют вакансии Ga, чем вакансии N. Ферромагнетизм возрастает по мере увеличения концентрации дырок.

* Работа поддержана грантом в рамках Постановления Правительства Российской Федерации № 220 от 09.04.2010 (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.06.2022).

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 53.09

DOI: 10.17223/00213411/67/4/8

**Исследование трансформации хлорамфеникола
под действием УФ-излучения и электронного пучка***

Н.П. Безлепкина¹, О.Н. Чайковская^{1,2}, Е.Н. Бочарникова¹,
В.И. Соломонов², А.С. Макарова²

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

² *Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Представлено спектрально-люминесцентное исследование трансформации хлорамфеникола в воде под действием импульсного электронного пучка (170 кэВ, плотность энергии в импульсе пучка 44.2 мДж/см²) и УФ-излучения бактерицидной лампы ОУФб-04 (от 180 до 275 нм), КгСl (222 нм), ХеВг (282 нм) и ХеСl (308 нм) эксилламп. Механизмы трансформации при облучении УФ-излучением и мощным электронным пучком существенно различаются, что проявляется в различных изменениях в спектрах поглощения и флуоресценции. Анализ конверсии хлорамфеникола и продуктов показал, что при облучении электронным пучком максимальная конверсия антибиотика составила 62% и была достигнута после 13 мин облучения, максимальная конверсия после 128 мин УФ-облучения составила: КгСl – 39%, ОУФб-04 – 22%, ХеВг и ХеСl – около 17%. Показано, что во время облучения КгСl эксиллампой происходит как разрушение хлорамфеникола, так и образовавшегося фотопродукта, флуоресцирующего в области 350 нм. При облучении электронным пучком образование продуктов трансформации хлорамфеникола было минимальным, по сравнению с УФ-облучением, и они разлагались в процессе облучения.

Ключевые слова: хлорамфеникол, фотолиз, разложение антибиотиков, УФ-излучение, электронный пучок.

Введение

Фармацевтические соединения представляют собой особую категорию новых микрозагрязнителей, которые представляют угрозу для экосистем из-за их вредной биологической активности [1, 2]. Антибиотики исследуются как новые загрязнители окружающей среды потому, что эти соединения способствуют развитию резистентных бактерий, которые стали серьезной проблемой здравоохранения из-за увеличения числа инфекций [3]. Инфекции, вызванные резистентными бактериями, становятся сложнее, а иногда их невозможно лечить из-за снижения эффективности антибиотиков. В результате неэффективного лечения человека увеличивается продолжительность болезни, заболеваемость и даже смертность. Антибиотик хлорамфеникол, объект данного исследования, по-прежнему остается пригодным антибиотиком местного применения для лечения офтальмологических бактериальных инфекций, однако в долгосрочной перспективе препарат станет непригодным из-за растущего уровня лекарственной устойчивости [4]. Среди различных офтальмологических бактериальных патогенов было выявлено 37 маркеров устойчивости к хлорамфениколу, из которых 23 (62.2%), 9 (24.3%) и 5 (13.5%) приходились на плазмиды, транспозоны и хромосомы соответственно. Преобладали два типа механизмов устойчивости к хлорамфениколу: ферменты ацетилтрансферазы хлорамфеникола, инактивирующие хлорамфеникол путем ацетилирования, и эффлюкс насосы хлорамфеникола, активно выводящие препарат при его попадании в бактериальную клетку [4].

Большинство антибиотиков и их остатки попадают в водные объекты в результате деятельности человека и оказывают негативное влияние на водные экосистемы, ухудшают качество воды. Среди источников загрязнения антибиотиками выделяют фармацевтическое производство, сточные воды больниц, а также аквакультуры, сельское хозяйство и птицеводство. Большинство очистных сооружений не справляются с очисткой сточных вод от антибиотиков [5]. Хлорамфеникол

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИЭФ УрО РАН (124022200004-5).

Формирование преломленной и отраженной электромагнитных волн метаповерхностями Панчаратнама – Берри с точки зрения молекулярной оптики

Б.Б. Авербух¹, И.Б. Авербух¹

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Среда скомпонована из одного, двух или нескольких плоскопараллельных монослоев, состоящих из электрических диполей. Диполи каждого монослоя параллельны друг другу. В соседних монослоях диполи расположены под определенным углом друг к другу. Рассмотрены случаи падения на метаповерхность линейно и циркулярно поляризованных волн. В модели молекулярной оптики описано явление кросс-поляризации и получены выражения для отраженного поля, поля в среде и за средой. В случае однослойной метаповерхности введен параметр киральности и рассмотрены различные ситуации на границе раздела. Описан принцип работы радиально градиентной плоской линзы.

Ключевые слова: молекулярная оптика, киральный метаматериал, электрический диполь, фаза Панчаратнама – Берри, единичный и нулевой показатели преломления, кросс-поляризация, обратная волна, плоская радиально градиентная линза.

Введение

Киральные метаматериалы обычно представляют собой системы резонансных включений во вмещающей их диэлектрической матрице. Киральность может быть обусловлена как зеркальной асимметрией самих включений, так и законом их расположения в среде. Изучение распространения электромагнитного излучения в таких средах интересно, в частности, благодаря возможностям создания на их основе различных приборов и устройств [1–11].

Решение задачи Френеля на границе раздела вакуум – киральная среда и анализ распространения волн в таких средах обычно основаны на решении уравнений Максвелла. Свойства среды описываются эффективными значениями диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей, а также параметра киральности χ [7, 10, 11]. Широко используются численные методы. Но использование эффективных параметров в уравнениях Максвелла не раскрывает механизм формирования отраженной и преломленной электромагнитных волн. Применение численных методов также оставляет скрытыми многие детали физических процессов при формировании этих волн. Поэтому нужен анализ, основанный на молекулярных представлениях о строении вещества и позволяющий получить информацию, недоступную при макроскопическом описании.

Размеры включений в метаматериале могут быть много меньше всех других характерных размеров задачи. В этом случае включения можно рассматривать как совокупность точечных электрических диполей, а их дипольные моменты считать пропорциональными внешнему полю. Процесс распространения поля в такой среде определяется взаимодействием этих дипольных моментов с падающим полем и описывается в рамках молекулярной оптики. Среда рассматривается как вакуум, в котором находятся диполи вещества. Под действием внешнего поля эти диполи становятся источниками вторичных когерентных электромагнитных волн. Интерференция этих волн определяет структуру электромагнитного поля в среде. Излучение вторичных источников, распространяющееся назад, интерферируя, создает отраженную волну. Вторичные волны, распространяющиеся вперед, интерферируя между собой и с падающей волной, формируют преломленную волну.

В данной работе в модели молекулярной оптики анализируется процесс формирования отраженных и преломленных волн при распространении излучения в киральной среде.

Среда состоит из периодически расположенных плоскопараллельных монослоев, составленных из точечных электрических диполей с поляризуемостью $A_d = A_d' - iA_d''$. Под действием

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 1 июня 2021 г. № 075-02-2021-1389, дополнительное соглашение с Минобрнауки России от 4 февраля 2022 г. № 075-02-2022-879. Соглашение от 16.02.2023 г. № 075-02-2023-932.

Дипольные и квадрупольные моменты ионов Э^{3-} молекул ЭX_3 в кристаллическом и газообразном состояниях

К.Ф. Халитов¹, Ф.Г. Халитов²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Для рядов молекул тетраэдрического строения ЭX_3 ($\text{Э} = \text{N}, \text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$; $\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{J}, \text{Ph}, \text{H}, \text{Me}$) получены количественные соотношения между величинами констант квадрупольного взаимодействия e^2Qq/h , параметрами J и дипольными моментами $\mu_{\text{Э}^{3-}}$. Показано, что для соединений с тригонально-пирамидальным строением, близким к C_{3v} -симметрии, соотношения между величинами e^2Qq/h и относительной величиной потенциала ионизации J описываются экспоненциальной зависимостью. Для молекул со значительным параметром асимметрии η наблюдаются отклонения от этой кривой. Зависимости величин e^2Qq/h от дипольных моментов $\mu_{\text{Э}^{3-}}$ ионов Э^{3-} молекул ЭX_3 объясняются суммарным взаимодействием электрических полей кристалла и валентных электронов с квадрупольным ядром. Установлены зависимости значений ЯКР частот $\nu_{(\text{Э})}$ атомов (^{75}As , ^{121}Sb) и $\nu_{(\text{X})}$ атомов (^{35}Cl , ^{79}Br , ^{125}I) от величин $\mu_{\text{Э}^{3-}}$. Линейные корреляции наблюдаются также для констант экранирования в спектрах ЯМР атомов фтора ^{19}F .

Ключевые слова: потенциал ионизации, соединения ЭX_3 ($\text{Э} = \text{N}, \text{P}, \text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$), дипольный момент, квадрупольный момент, градиент электрического поля.

Введение

Известно, что метод ЯКР позволяет получить информацию о градиенте электрического поля (ГЭП) электронов на ядре молекулы. Эта величина зависит от изменения состояния электронов валентной оболочки, определяющих свойства многих физико-химических характеристик соединений. Вместе с тем неоднозначность при интерпретации величин констант квадрупольного взаимодействия при межмолекулярных взаимодействиях вещества в кристаллическом состоянии, приводящих к изменению геометрического и электронного строения соединений, требует поиска путей раздельного рассмотрения влияния разных факторов. В работах [1–6] показана необходимость знания величин ГЭП при решении различных задач. В [1] для исследования локального градиента электрического поля и магнитного возбуждения в TaSb_2 используют метод ЯКР в сочетании с расчетами по теории функционала плотности (DFT) и данными для кристаллических структур. Определены величины и направления главных осей ГЭП, проведены их температурные зависимости. Этот подход ранее позволил исследовать возбуждения фермионов Вейля в нулевом магнитном поле [2]. В [3] для исследования локальных магнитных полей соединений Sb , Bi изучено поведение спектральных параметров ЯКР. Флуктуационные процессы плотности заряда, создающие локальные дипольные электрические моменты и, соответственно, электрические поля, индуцируют упорядоченные магнитные поля. В [4] проведен анализ величин ГЭП двухатомных молекул BiN , BiP , BiF , BiCl , BiI и SbN , SbP , SbF , SbCl . При расчетах полный градиент электрического поля eq принят равным сумме ядерного $eq_{\text{яд}}$ и электронного вкладов $eq_{\text{е}}$. Анализ электронных вкладов отдельных орбиталей молекулы в значение $eq_{\text{е}}$ показал, что основную долю в ГЭП вносят валентные электроны. Например, в молекулах SbN и SbP отрицательное, а в ряду $\text{SbCl}(\text{F})$ положительное значение ГЭП связано с высоким вкладом $5p(\text{Sb})$ электронов. Во всех случаях при увеличении электроотрицательности заместителей при Bi или Sb наблюдается рост величины ГЭП. В [5] определены эффективные заряды всех атомов решеток сверхпроводящих керамик. В рамках модели точечных зарядов использован метод сравнения рассчитанных и экспериментальных параметров ядерного квадрупольного взаимодействия. Авторы считают, что определение эффективных зарядов атомов в узлах кристаллической решетки позволяет сузить круг допустимых моделей в квантово-механических расчетах электронных свойств. В статье [6] показано, что в рамках простой ионной модели точечных зарядов удастся объяснить основные свойства и детали высокотемпературных сверхпроводников. По мнению авторов, суммарный ГЭП определяется раздельно полями валентных электронов $eq_{\text{е}}$ и зарядов атомов кристаллической решетки $eq_{\text{кр}}$.

Цель настоящей работы – поиск общих закономерностей для констант квадрупольного взаимодействия (ККВ) элементов 15 группы периодической системы в различных молекулах; исследо-

Отработка методов измерения расходимости излучения в лазерной системе THL-100*

С.В. Алексеев¹, В.Ф. Лосев¹

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

Приводятся результаты исследования методик измерения расходимости излучения в лазерной системе THL-100 по распределению ее интенсивности в дальней зоне. Обращается внимание на проблемы регистрации параметров пучка в воздухе с большим диаметром (до 200 мм), связанные с искажением волнового фронта на неоднородностях воздуха. Изучаются разные оптические схемы фокусировки пучка с различным его диаметром. Показано, что лучшие результаты достигаются только при снижении диаметра пучка до 90 мм, когда появляется возможность регистрировать расходимость излучения, близкую к дифракционному пределу $1.5Q_d$.

Ключевые слова: фотодиссоционный XeF(C-A)-усилитель, Ti:Sa-стартовый комплекс, чирпированный импульс, расходимость, дальняя зона, линза, сферическое зеркало, интенсивность, фокальная перетяжка.

Введение

В настоящее время создание сверхмощных лазерных систем с фемтосекундной длительностью импульса основано главным образом на применении твердотельных титан-сапфировых или параметрических усилителей и техники усиления положительно чирпированных импульсов, т.е. растянутых во времени методом линейной частотной модуляции в стретчере [1]. Удлинение импульса необходимо для снижения его мощности ниже порога, при котором возникает самофокусировка пучка, и обычно составляет в твердотельных системах величину порядка 10^4 раз (до 0.5–1 нс). После усиления импульсы снова сжимают до исходной длительности в компрессоре на основе дифракционных решеток. Все эти системы работают в инфракрасной области спектра (0.8–1 мкм) [2–7]. Расширение спектрального диапазона их действия позволяет раздвинуть границы области применений таких систем и в ряде случаев способствует повышению эффективности взаимодействия фемтосекундного излучения с веществом [8]. Известен путь продвижения в видимую область спектра за счет генерации второй гармоники (ВГ) инфракрасного (ИК) излучения [6, 7]. Однако возможности преобразования сверхмощных пучков ИК-излучения во вторую гармонику ограничены технологическими трудностями изготовления тонких (менее 1 мм толщиной) нелинейных кристаллов достаточно большого диаметра (более 20 см), которые требуются при накачке широким спектром и высокой интенсивностью излучения с фемтосекундной длительностью импульса. Кроме этого, данный метод имеет другой существенный недостаток – преобразованное излучение имеет очень низкое качество излучения из-за фазовой самомодуляции, кроссмодуляции, керровской самофокусировки и глубокой модуляции спектра ВГ в нелинейном кристалле.

В ИСЭ СО РАН, г. Томск, развивается альтернативный путь создания мультитераваттных лазерных систем. Он основан на использовании твердотельного фемтосекундного лазерного комплекса и фотодиссоционного XeF(C-A)-усилителя с газовой активной средой [9, 10]. При этом фемтосекундный импульс формируется в твердом теле, а его энергия повышается в газовом усилителе. Достоинством такой гибридной (твердотельная и газовая активные среды) схемы построения мощных фемтосекундных систем является более низкая оптическая нелинейность газовой активной среды по сравнению с твердым телом, видимый диапазон излучения, возможность масштабирования и достижения высокого контраста без использования дополнительных оптических устройств. В 2012 г. на лазерной системе THL-100 была получена рекордная для видимой области спектра мощность 14 ТВт [9], а в 2019 г. мощность была повышена до 40 ТВт [10].

Следует отметить, что одним из важнейших параметров лазерного пучка является его расходимость. Однако до настоящего времени исследованию расходимости излучения на лазерной системе THL-100 уделялось недостаточно внимания. И связано это с тем, что регистрация расходимо-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2021-0014).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.5.013.12

DOI: 10.17223/00213411/67/4/12

К вопросу обобщения формулы Стокса

С.О. Гладков¹¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

Приводится обобщение формулы Стокса, позволяющей вычислять силу сопротивления для любых шарообразных тел, в том числе сильно неоднородных по составу. Показано, что во всех физически интересных случаях при использовании различных граничных условий в предельном переходе к однородному твердому шару всегда получается классическая формула Стокса $F = 6\pi\eta R u$.

Ключевые слова: сила Стокса, динамическая вязкость, уравнение Навье – Стокса, граничные условия.

Введение

Вопрос, на котором нам хотелось бы сейчас подробно остановиться, относится к общим проблемам классической гидродинамики. Хорошо проверенная как теорией, так и практикой формула Стокса [1] для силы сопротивления позволяет использовать ее в качестве некоторого эталона для проверки результатов вычислительного характера, когда речь идет о нахождении силы сопротивления в случае неоднородных по составу сферических тел. Например, пористых или двухслойных [2, 3].

Стоит в этой связи заметить, что применение общей формулы (20.14а), приведенной в [1], а именно $F = 8\pi\eta a u$, необходимо использовать с осторожностью, поскольку она справедлива только для классической задачи Стокса, когда коэффициенты a и b , фигурирующие в функции $f = ar + \frac{b}{r}$, удовлетворяющей бигармоническому уравнению $\Delta^2 f = 0$, связаны простым линейным соотношением $a = \frac{3b}{R^2}$, где R – радиус твердой однородной непроницаемой сферы.

В том случае, если речь идет, например, о капле жидкости, как в задаче Рибчинского (см. [1, с. 98]) линейное соотношение $a = \frac{3b}{R^2}$ уже не имеет места, поскольку условие «залипания» потока в этой задаче выполняется лишь для нормальной компоненты скорости $v_r|_{r=R} = v'_r|_{r=R} = 0$, но не для касательной, для которой должно выполняться только условие непрерывности на границе. Именно поэтому следует использовать не формулу

$$F = 8\pi\eta a u, \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость, u – скорость потока, R – радиус шара, а более общую формулу, которую несложно получить, используя общий алгоритм решения задачи Стокса, но только в терминах параметров a и b . Именно об этой формуле и пойдет речь в настоящей работе.

1. Формула Стокса в общем виде, выраженная через параметры a и b

Поскольку алгоритм решения задачи Стокса подробно изложен как в монографии [1], так и во многих других учебниках по гидродинамике, мы не будем его воспроизводить полностью, а воспользуемся только общим подходом и формулами, необходимыми для понимания окончательного результата.

Действительно, в соответствии с известным алгоритмом решения воспользуемся стационарным уравнением Навье – Стокса, справедливым в пограничной к поверхности тела области:

$$\nabla P = \eta \Delta \mathbf{v}, \quad (2)$$

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 4

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 22.04.2024. Выпуск в свет 26.04.2024. Заказ № 5880.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 13.02. Уч.-изд. л. 14.58. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 531-528, 529-849.
<http://publish.tsu.ru>; e-mail: rio.tsu@mail.ru

