

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

5·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Май, 2025

№ 5 (810)

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

12+

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
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
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
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
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

Семёнов А.Д., Шкурина Е.Д., Печерская Е.А., Голубков П.Е., Александров В.С., Якушов Д.В. Расчет динамических характеристик линеаризованной модели процесса микродугового оксидирования.....	5
Левин Ю.К. Энергия нанопузырей с гидратной оболочкой	18
Саммель А.Ю., Скосырский А.Б., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Буркин В.В., Кудрявцев В.А., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Хабибуллин М.В. Экспериментально-теоретическое исследование процесса высокоскоростного взаимодействия стального ударника с двухслойным металлокерамическим материалом.....	24
Кеда И.С., Доценко О.А., Алмаев Д.А., Вагнер Д.В. Электрофизические свойства акриловых композитов с многостенными углеродными нанотрубками.....	31

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Ершков М.Н., Шепелев А.Е., Солохин С.А., Сметанин С.Н., Антипов А.А., Путилов А.Г., Канаев А.Ю., Оболдуев Д.А. Сравнительное исследование генерации лазера на композитном Nd ³⁺ :YAG / Cr ⁴⁺ :YAG-керамическом элементе и лазера на монокристаллическом Nd ³⁺ :YAG-элементе с пассивным модулятором на кристалле LiF:F ²⁻	39
---	----

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Коровин Е.Ю., Матыскин К.Е., Атутов Е.Б., Павлова А.А., Трофимов Е.А., Суляев В.И. Электромагнитные свойства защитных экранов для снижения воздействия электромагнитного излучения на операторов носимых устройств подавления БПЛА	48
--	----

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Юдин Н.Н., Соснин Э.А., Белоплотов Д.В., Сорокин Д.А., Кузнецов В.С., Антипов О.Л., Слюнько Е.С., Зиновьев М.М., Подзывалов С.Н., Кальсин А.Ю., Габдрахманов А.Ш., Лысенко А.Б., Кулеш М.М. Влияние плазменного травления на порог оптического пробоя нелинейных кристаллов ZnGeP ₂ в области длин волн ~ 2.1 мкм.....	56
Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Ковадло П.Г. Физически-информируемые нейронные сети для оценки интенсивности атмосферной оптической турбулентности	66
Чайковская О.Н., Бочарникова Е.Н., Соломонов В.И., Макарова А.С., Спирина А.В., Чайковский С.А., Соколова И.В. Воздействие электронного пучка на трансформацию фенола в воде в присутствии гуминовых веществ	74

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Вовченко Е.Д., Козловский К.И., Скрипник А.П., Шиканов А.Е. Восстановление поля кольцевого магнита по данным измерений вектора индукции.....	84
--	----

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Адуев Б.П., Лисков И.Ю., Митрофанов А.Ю., Нурмухаметов Д.Р. Особенности зажигания микрочастиц бурого угля лазерным излучением с различной структурой	90
--	----

CONTENTS

CONDENSED-STATE PHYSICS

Semenov A.D., Shkurina E.D., Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Alexandrov V.S., Yakushov D.V. Calculation of dynamic characteristics of a linearized model of the micro-arc oxidation process	5
Levin Yu.K. Effect of hydration shell on the energy of nanobubbles in water.....	18
Sammel A.Yu., Skosyrsky A.B., Dyachkovskiy A.S., Ishchenko A.N., Burkin V.V., Kudryavtsev V.A., Stepanov E.Y., Chupashev A.V., Khabibullin M.V. Experimental and theoretical study of the process of high-speed interaction of a steel striker with a two-layer metal-ceramic material	24
Keda I.S., Dotsenko O.A., Almaev D.A., Wagner D.V. Electrophysical properties of acrylic composites with multi-wall carbon nanotubes.....	31

QUANTUM ELECTRONICS

Ershkov M.N., Shepelev A.E., Solokhin S.A., Smetanin S.N., Antipov A.A., Putilov A.G., Kanaev A.Yu., Obolduev D.A. Comparative study of laser generation on a composite Nd ³⁺ :YAG / Cr ⁴⁺ :YAG ceramic element and a laser on a single-crystal Nd ³⁺ :YAG element with a passive modulator on a LiF:F ²⁻ crystal.....	39
---	----

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Korovin E.Yu., Matyskin K.E., Atutov E.B., Pavlova A.A., Trofimov E.A., Suslyaev V.I. Electromagnetic properties of protective screens to reduce the impact of electromagnetic radiation on operators of wearable UAV suppression devices	48
--	----

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Yudin N.N., Sosnin E.A., Beloplotov D.V., Sorokin D.A., Kuznetsov V.S., Antipov O.L., Slyunko E.S., Zinoviev M.M., Podzyvalov S.N., Kalsin A.Yu., Gabdrakhmanov A.Sh., Lysenko A.B., Kulesh M.M. Effect of plasma etching on optical breakdown threshold of nonlinear ZnGeP ₂ crystals in wavelength region ~ 2.1 μm.....	56
Shikhovtsev A.Yu., Kiselev A.V., Kovadlo P.G. Physically-informed neural networks for estimation of atmospheric optical turbulence intensity	66
Tchaikovskaya O.N., Bocharnikova E.N., Solomonov V.I., Makarova A.S., Spirina A.V., Chaikovskiy S.A., Sokolova I.V. Electron beam induced transformations of phenol in water in the presence of humic substances	74

PLASMA PHYSICS

Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Skripnik A.P., Shikanov A.E. Reconstruction of the field of a ring magnet based on the induction vector measurements.....	84
---	----

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Aduev B.P., Liskov I.Y., Mitrofanov A.Y., Nurmukhametov D.R. Features of ignition of brown coal microparticles by laser radiation with different structure	90
---	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.316.723.2

DOI: 10.17223/00213411/68/5/1

Расчет динамических характеристик линеаризованной модели процесса микродугового оксидирования*

А.Д. Семёнов¹, Е.Д. Шкурина¹, Е.А. Печерская¹,
П.Е. Голубков¹, В.С. Александров¹, Д.В. Якушов¹

¹ Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Исследование посвящено разработке имитационной модели процесса микродугового оксидирования. Модель позволяет с высокой точностью определить электрические параметры схемы замещения гальванической ячейки (сопротивление и емкость покрытия) методом параметрической идентификации, и с их помощью воспроизвести осциллограммы тока и напряжения, т.е. обеспечить возможность «виртуального эксперимента» без использования технологического оборудования. Такой подход к моделированию позволяет сократить затраты на отработку технологии получения оксидокерамических покрытий и служит основой для создания цифрового двойника процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, математическая модель, линеаризованная модель, электрическая схема замещения гальванической ячейки, параметрическая идентификация.

Введение

В настоящее время с целью защиты от износа и коррозии применяется модифицирование поверхности вентильных металлов методом микродугового оксидирования (МДО) [1–3]. Получаемые в результате этого процесса покрытия обладают перспективными физическими и химическими параметрами, что обуславливает их широкое использование в различных отраслях промышленности: в машино- и приборостроении, в изделиях авиационно-космической техники, медицинского назначения и во многих других направлениях [4–6]. Основные конкурентные преимущества микродуговых покрытий связаны с сочетанием их уникальных характеристик, таких как высокие значения износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости [7, 8], а также с возможностью получения требуемых параметров, в том числе толщины, пористости [9, 10].

Главными проблемами технологии МДО в настоящее время являются повышение энергоэффективности технологического процесса нанесения покрытий и трудность его автоматизации [11]. Первая из этих проблем традиционно решается путем отработки технологии в ходе многочисленных экспериментов с целью подбора оптимального технологического режима нанесения покрытий. Вторая проблема связана с влиянием на свойства покрытий большого количества разнородных факторов, а также с разнообразием технологических режимов получения покрытий, что предполагает создание специализированных баз данных. Более эффективным решением этих проблем могла бы стать разработка цифрового двойника процесса МДО, т.е. сложной имитационной модели, способной в режиме симуляции с высокой точностью воспроизводить весь процесс получения покрытий с учетом заданных параметров обработки и влияющих факторов без необходимости задействовать основное технологическое оборудование. Это позволит значительно сократить количество натурных испытаний, тем самым снизив энергетические и временные затраты на отработку технологии.

Сложность в создании цифрового двойника процесса МДО заключается в недостаточной исследованности механизма формирования покрытий, который включает в себя электрохимические и плазмохимические реакции, процессы зажигания и гашения микроарядов, образования и схлопывания парогазовых пузырьков и др. [12]. Разработка комплексной математической модели, учитывающей данные явления в едином взаимосвязанном процессе, представляет собой сложную за-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования» (№ 123091800009-1).

Энергия нанопузырей с гидратной оболочкой

Ю.К. Левин¹

¹ *Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Показано, что энергия заряженного объемного нанопузыря (ОНП) образована парциальными энергиями свободного и связанных зарядов в вакууме, а также энергиями поляризации диэлектрика в гидратном слое и за его пределами. Гидратный слой увеличивает энергию ОНП в 5.3 раза при радиусе 5 нм и не более 8% при радиусе более 25 нм на величину, близкую к энергии этого слоя. Энергия поляризации диэлектрической среды почти на 2 порядка превосходит энергию зарядов в вакууме в гидратном и диффузном слоях. При радиусе менее 26 нм полная электростатическая энергия ОНП внутри гидратной оболочки больше, чем за ее пределами. У более крупных нанопузырей больше энергии сосредоточено за пределами гидратной оболочки.

Ключевые слова: *диэлектрическая жидкая среда, кулоновское и лапласовское давление, связанный наведенный поляризационный заряд, размер и заряд нанопузырей.*

Интерес к объемным нанопузырям (ОНП) в воде связан с перспективами их применения в различных областях [1, 2]. Нанопузырьковые технологии широко востребованы для решения проблем изменения климата, охраны окружающей среды, снижения затрат и энергопотребления в таких промышленных процессах, как флотация, аэрация и озонирование. Также с помощью ОНП решаются проблемы экологии, сельского хозяйства, в медицине/биомедицине, при оптимизации терапевтических и диагностических методов и других областей благодаря их малому размеру, большой удельной площади поверхности, длительному времени пребывания в воде, высокой мощности массопереноса, высокому дзета-потенциалу [3]. Применение ОНП при очистке коммерческих и бытовых сточных вод вместо ранее использовавшихся биологических подходов снижает затраты энергии, повышает эффективность, исключает дорогие химикаты и многоступенчатую обработку [4]. Поэтому исследование свойств ОНП, в том числе их стабильности, актуально, чем объясняется активное обсуждение этого вопроса в литературе [5–7].

Очевидно, в основе любого технологического прорыва лежат фундаментальные знания. Это относится и к ОНП, в частности, к его электростатической энергии: какова ее природа, ее составляющие и соотношение между ними. Из работ [8, 9] было известно, что вблизи границы раздела вода упорядочена слоями толщиной несколько молекулярных диаметров от этой границы, где молекулы стремятся сохранить максимальное количество водородных связей и «силы упаковки» создают плотный слой в контакте с поверхностью. Направления дипольных моментов \mathbf{p} выравниваются в приповерхностном слое в касательном направлении, так как ориентацию вектора поляризации диполя определяет водородная связь, а не электрическое поле. Четкая слоистая структура воды формируется в пределах $\Delta \approx 1$ нм от поверхности электрода независимо от его гидрофильности. Это подтвердили как расчеты методом молекулярной динамики [10], так и сканирующая диэлектрическая микроскопия локальной емкости воды между атомарно плоскими стенками, которая также обнаружила межфазный Δ -слой толщиной 1 нм с относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) $\epsilon_1 \approx 3$ [11]. Принцип экономии энергии применим и к ОНП с закрепленным на его оболочке зарядом q_0 . Это легло в основу гипотезы, предложенной в [12], где показано, что Δ -слой минимизирует энергию ОНП, так как водородные связи высвобождают больше энергии, чем поляризация диполей в электрическом поле. В итоге получен вывод, что ОНП в воде окружен гидратным Δ -слоем (далее – слой А, $r_0 < r < r_0 + \Delta$, $\epsilon_A = 3$), вне которого расположен диффузный слой (слой В, $r > r_0 + \Delta$, $\epsilon_B = 80$). Поскольку в электрическом поле заряда ОНП q_0 окружающая диэлектрическая среда поляризуется, то формируются две двухслойные оболочки: первая образована свободным зарядом q_0 и примыкающим к нему связанным зарядом q_1 (у внутренней границы области А). Вторая образована связанными зарядами q_2 у внешней границы области А и q_3 у внутренней границы области В (рис. 1).

Экспериментально-теоретическое исследование процесса высокоскоростного взаимодействия стального ударника с двухслойным металлокерамическим материалом*

А.Ю. Саммель¹, А.Б. Скосырский¹, А.С. Дьячковский¹,
А.Н. Ищенко¹, В.В. Буркин¹, В.А. Кудрявцев¹,
Е.Ю. Степанов¹, А.В. Чупашев¹, М.В. Хабибуллин¹

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

Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований высокоскоростного взаимодействия стального цилиндрического ударника с конической головной частью с градиентно-слоистым металлокерамическим материалом ($TiB_2+Ti_xCo_y$)+Ti. Методом математического моделирования проведен расчет высокоскоростного взаимодействия данной металлокерамической пластины с ударником в рамках упруго-идеально-пластической модели Прандтля – Рейсса. Проведена оценка торможения ударника в процессе высокоскоростного взаимодействия. Показано, что данный градиентно-слоистый металлокерамический материал способен эффективно рассеивать кинетическую энергию удара.

Ключевые слова: ударник, высокоскоростное взаимодействие, металлокерамическая пластина, математическое моделирование.

Градиентно-слоистые металлокерамические материалы [1–5] представляют собой особый класс композиционных материалов, которые демонстрируют превосходные механические свойства по сравнению с обычными монолитными материалами. Основная идея заключается в создании слоистой структуры, состоящей из чередующихся слоев металла и керамики. Каждый слой имеет разные физические и механические свойства, что позволяет материалу эффективно рассеивать энергию удара.

В настоящей работе для получения комбинированного металлокерамического материала был использован метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Полученный двухслойный металлокерамический материал является композицией из двух слоев, один из которых представляет собой продукт экзотермической реакции системы Ti+V+Co в виде прослойки, полученной за счет приложения давления к разогретому СВС-продукту, а другой – подложка, роль которой играет титановая пластина. С целью исследования высокоскоростного взаимодействия стального ударника с комбинированным металлокерамическим материалом ($TiB_2+Ti_xCo_y$)+Ti были проведены баллистические испытания и математическое моделирование. Данная металлокерамическая пластина имела общую толщину 11.8 мм, которая складывалась из толщины лицевого металлокерамического слоя 8.8 мм и толщины тыльного слоя 3 мм. Общая поверхностная плотность данной пластины равнялась 5.94 г/см^2 , твердость металлокерамического слоя составляла 85 HRA. На рис. 1 приведен внешний вид изготовленной металлокерамической пластины.

Проведено экспериментальное исследование данного двухслойного металлокерамического материала при высокоскоростном взаимодействии с ударником цилиндрической формы, имеющим конусную головную часть (рис. 2, а). Ударник диаметром 6 мм, выполненный из стали марки У12 с твердостью 86 HRA, разгонялся с помощью испытательной установки с использованием пластикового ведущего устройства (рис. 2, б). В процессе взаимодействия изучался характер разрушения металлокерамического материала.

Процесс взаимодействия фиксировался высокоскоростной камерой. Характерные кадры высокоскоростного взаимодействия ударника с металлокерамической пластиной приведены на рис. 3. При подлете к исследуемой пластине ударник имел скорость 626 м/с. На рис. 3 отчетливо видно, что в начальный момент соударения (б) наблюдается интенсивный вынос металлокерамического материала в области контакта с ударником. В процессе внедрения ударника в металлокерамическую пластину вынос материала только увеличивается, о чем свидетельствует кадр, представленный на рис. 3, в, где также наблюдается начало движения титановой подложки. При даль-

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

Электрофизические свойства акриловых композитов с многостенными углеродными нанотрубками*

И.С. Кеда¹, О.А. Доценко^{1,2}, Д.А. Алмаев^{1,2}, Д.В. Вагнер¹

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

² *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования частотной зависимости диэлектрической проницаемости композиционных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок. Экспериментальные образцы были изготовлены из акриловой краски с добавлением углеродных нанотрубок, концентрация которых равна 0,5, 1,0 и 1,5 мас.%. Для обработки смеси использовался ультразвуковой излучатель с мощностью 25 Вт и частотой колебаний 25 кГц. Измерения проводились конденсаторным методом. Проведено сравнение комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости на переменном токе исследуемых образцов, изготовленных при различной длительности ультразвуковой обработки. Показано, что длительность ультразвуковой обработки исходной суспензии влияет на комплексную диэлектрическую проницаемость и проводимость, что позволяет получать материалы с отличающимися электрофизическими характеристиками без изменения состава смеси.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, композит, ультразвуковая обработка, диэлектрическая проницаемость, конденсаторный метод.

Введение

Техногенный электромагнитный фон, создаваемый разнообразным электронным оборудованием, таким как источники питания, компьютеры, приемники, передатчики, антенны и др., значительно преобладает над естественным [1–4]. Ухудшение электромагнитной обстановки, вызванной высоким уровнем напряженности электромагнитного поля, наблюдается в местах, где одновременно работает большое количество единиц оборудования как на низких [3, 4], так и на высоких [1, 2] частотах. Отдельной задачей является то, что с развитием электроники повышается чувствительность, и вместе с ней растет восприимчивость высокочастотного электронного оборудования к различного рода помехам. Все это приводит к нарастанию проблемы электромагнитной совместимости.

Для снижения электромагнитного фона и обеспечения электромагнитной совместимости электронного оборудования традиционно применяют материалы, поглощающие электромагнитное излучение. При разработке композиционных материалов, предназначенных для этих целей, в качестве наполнителей используют магнитные материалы, сажу, мелкодисперсные металлические частицы, но добавление в композит углеродных нанотрубок (УНТ) существенно изменяет электромагнитные характеристики. В работе [5] для изготовления поглощающих материалов рассматривают композиты с порошком феррита, в [6] – с карбонильным железом, а в [7] с этой целью наноразмерные частицы кобальта смешивают с многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ).

Авторы статьи [8] предлагают добавлением МУНТ в цемент получать поглотитель электромагнитных волн. В свою очередь, в [9] рассматривается возможность получения легкого полимерного поглотителя электромагнитных волн на основе композита, содержащего МУНТ. Исходя из этого, можно сделать вывод, что углеродные нанотрубки являются востребованными материалами для разработки поглотителей электромагнитного излучения, а исследование их электромагнитных свойств является актуальной задачей.

УНТ обладают уникальными электрофизическими, механическими, термическими и оптическими свойствами [10, 11], что представляет фундаментальный интерес и открывает ряд возможностей для прикладных применений. Они могут быть использованы в качестве зондов сканирующей микроскопии, чувствительных элементов различных датчиков, проводящих каналов транзисторов и наполнителей композиционных материалов [12]. Наибольшее внимание со стороны исследовательского сообщества направлено на изучение свойств композиционных материалов с включениями одностенных и многостенных УНТ в качестве проводящих наполнителей для создания поглощающих или отражающих покрытий, что связано с их высокой проводимостью и воз-

* Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 535.8

DOI: 10.17223/00213411/68/5/5

Сравнительное исследование генерации лазера на композитном Nd³⁺:YAG / Cr⁴⁺:YAG-керамическом элементе и лазера на монокристаллическом Nd³⁺:YAG-элементе с пассивным модулятором на кристалле LiF:F^{2-*}

М.Н. Ершков¹, А.Е. Шепелев^{1,2}, С.А. Солохин¹, С.Н. Сметанин³,
А.А. Антипов², А.Г. Путилов², А.Ю. Канаев⁴, Д.А. Оболдуев⁴

¹ Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров, Россия

² Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

⁴ ФКП «ГЛП «Радуга», г. Радужный, Россия

Представлены результаты исследований параметров излучения лазера на базе композитного элемента из отечественной Nd³⁺:YAG / Cr⁴⁺:YAG-керамики в сравнении с лазером на базе монокристаллического Nd³⁺:YAG-элемента с пассивным модулятором на кристалле LiF:F^{2-*}. Установлено, что при использовании композитного элемента средняя мощность генерации составила 4.2 Вт при дифференциальном КПД 28.6% и общей эффективности 24%. В лазере на монокристаллическом активном элементе средняя мощность генерации составила 5.0 Вт при дифференциальном КПД 34.9% и общей эффективности 27.8%.

Ключевые слова: лазерная керамика, композитный элемент, кристалл ИАГ: Nd³⁺, пассивная модуляция добротности, кристалл LiF:F^{2-*}.

Введение

Компактные твердотельные лазеры на базе активных элементов, изготовленных из оптической керамики, представляют несомненный научный интерес [1–6], поскольку такие лазеры могут найти применение не только для прецизионной лазерной микрообработки, но также в лазерных системах различного назначения. Например, в системах дальнометрии, а также в составе систем видения беспилотных летательных аппаратов. Это связано, с одной стороны, с рядом преимуществ оптической керамики по сравнению с монокристаллами, получаемыми традиционными методами [1, 2], с другой – с развитием технологии изготовления керамических активных элементов, в частности с возможностью изготовления композиционных сред, состоящих из нескольких частей, различающихся по концентрации или виду активных центров [7–10]. При этом одна из частей в композитном элементе может являться пассивным лазерным затвором, что позволяет реализовать генерацию коротких нано- и субнаносекундных лазерных импульсов мегаваттного уровня мощности [11–15]. Отдельный интерес представляют полностью керамические композитные лазерные среды, состоящие непосредственно из активного элемента Nd³⁺:YAG и области с насыщающимся поглотителем Cr⁴⁺:YAG [13–17]. Лазеры на основе таких композитных сред могут стать экономически более выгодной заменой традиционным кристаллическим Nd³⁺:YAG / Cr⁴⁺:YAG-лазерам, например, при создании мощных компактных источников излучения видимого и ультрафиолетового диапазона.

В работе [13] впервые сообщается о генерации лазера на композитной Nd³⁺:YAG / Cr⁴⁺:YAG-керамике с торцевой диодной накачкой. Исследовались керамические элементы диаметром 9 мм длиной 7.5, 5 и 3.5 мм с различным уровнем легирования Nd³⁺: от 1.1 до 2.0 ат.%. Длина области насыщающегося поглотителя Cr⁴⁺:YAG для всех исследуемых элементов составляла 2.5 мм с начальным коэффициентом пропускания 0.3. При накачке импульсами излучения с энергией до 33 мДж при длительности 250 мкс и их частоте следования 5 Гц была получена генерация лазер-

* Работа выполнена в рамках субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00101-24-02 от 14.05.2024 г.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 551.521.3; 551

DOI: 10.17223/00213411/68/5/6

**Электромагнитные свойства защитных экранов
для снижения воздействия электромагнитного излучения
на операторов носимых устройств подавления БПЛА***Е.Ю. Коровин¹, К.Е. Матышкин³, Е.Б. Атутов^{1,2},
А.А. Павлова¹, Е.А. Трофимов¹, В.И. Суслиев¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*² *Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*³ *ООО «МК-Электрон», г. Северск, Россия*

Рассмотрены вопросы, связанные с необходимостью организации антидроновой борьбы методами радиоэлектронной борьбы. Полученные путем моделирования результаты для типового элемента устройств подавления беспилотных летательных аппаратов показали наличие паразитного излучения в сторону оператора. Показаны возможные негативные воздействия электромагнитного излучения на здоровье оператора. Предложен способ защиты оператора металлическим экраном с покрытием из композита на основе карбонильного железа в полимерной матрице. Экспериментально исследованы электромагнитные характеристики предложенного защитного устройства. Проведено моделирование коэффициента отражения на выбранной оптимальной толщине. Разработанный защитный экран позволяет существенно подавить это излучение без ухудшения тактико-технических характеристик устройства подавления.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, карбонильное железо, беспилотный летательный аппарат, коэффициент отражения, диаграмма направленности, безопасность жизнедеятельности.

Введение

В последние несколько лет применение автономных беспилотных систем (дронов) расширяется большими темпами во всех видах транспорта: на воде, на земле и в воздухе. С наибольшей активностью разрабатываются и используются дроны, которые Воздушным кодексом РФ определены в разряд беспилотных воздушных судов (БВС), хотя чаще в научных публикациях и в средствах массовой информации используется термин «Беспилотный летательный аппарат (БПЛА)». По оценкам экспертов [1], рынок БВС-БПЛА будет увеличиваться в течение периода 2022–2027 гг. с ежегодным темпом роста более 15%. Среди отраслей по использованию таких аппаратов лидируют аэросъемка, картография, мониторинг территорий. По данным Росавиации, на конец 2022 г. в РФ были зарегистрированы около 70 тыс. гражданских беспилотников, а на конец 2023 г. – 93 тыс. При этом на начало 2024 г. 67 тыс. гражданских дронов принадлежит физическим лицам, а 25 тыс. – юридическим лицам. Тенденция роста БВС-БПЛА в долларовом исчислении по оценкам [2] представлена на рис. 1.

Развитие событий в последнее время позволяет предположить, что данные прогнозы, произведенные по результатам 2020–2022 гг., имеют заниженные оценки. Основанием для этого заключения служит тот факт, что наряду с полезным применением в перевозке грузов, в сельском хозяйстве, на почте, в кинематографии и журналистике беспилотники активно применяются военнослужащими, выполняющими задачи в Специальной военной операции (СВО). Из средств массовой информации известно, какое значение имеет применение дронов в СВО. Однако следует учесть, что с точки зрения технологии обеспечения безопасности жизнедеятельности беспилотники сегодня – это не только военная угроза. В зоне риска находятся и объекты гражданской инфраструктуры – определенные враждебные обществу силы активно используют БПЛА для нарушения источников электроснабжения, водоснабжения, систем связи, транспортной системы и прямого воздействия на здоровье и жизнь людей. Для совершения терактов привлекательны: стратегические государственные объекты, объекты критической инфраструктуры государства, места массо-

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00686.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.375.826

DOI: 10.17223/00213411/68/5/7

**Влияние плазменного травления
на порог оптического пробоя нелинейных кристаллов $ZnGeP_2$
в области длин волн ~ 2.1 мкм***

Н.Н. Юдин^{1,2}, Э.А. Соснин³, Д.В. Белоплатов³, Д.А. Сорокин³, В.С. Кузнецов^{1,2},
О.Л. Антипов⁴, Е.С. Слюнько^{1,2}, М.М. Зиновьев^{1,2}, С.Н. Подзывалов^{1,2},
А.Ю. Кальсин^{1,2}, А.Ш. Габдрахманов^{1,2}, А.Б. Лысенко^{1,2}, М.М. Кулеш¹

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

² *ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия*

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

⁴ *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Проведены исследования влияния плазменной очистки поверхности на оптическую стойкость монокристаллического $ZnGeP_2$, было установлено изменение порога оптического пробоя при различных параметрах плазменной очистки поверхности кристаллов. При воздействии низкотемпературной плазмы в атмосфере с концентрацией электронов 10^{14} – 10^{15} см⁻³ при напряжении 13–20 кВ и частоте следования импульсов 50–100 Гц на полированную поверхность $ZnGeP_2$ в течение 500 000 импульсов с длительностью ~ 40 нс наблюдается увеличение порога оптического пробоя образцов на 30%.

Ключевые слова: оптический пробой, $ZnGeP_2$, параметрические генераторы света.

Введение

$ZnGeP_2$ – полупроводниковое соединение из группы $A^2B^4C^5_2$ – имеет широкий диапазон прозрачности в средней ИК-области спектра, высокое значение диэлектрической восприимчивости второго порядка, двулучепреломление, достаточное для согласования скоростей (и фаз) у оптических пучков с разными частотами (длинами волн), малую температурную зависимость показателей преломления и относительно высокую удельную теплопроводность [1].

На основе $ZnGeP_2$ разработаны импульсно-периодические источники мощного когерентного излучения среднего ИК-диапазона с дискретным набором длин волн и/или плавной перестройкой по спектральному диапазону. Наибольшее преимущество кристаллы $ZnGeP_2$ представляют для создания когерентных источников оптического излучения, перестраиваемых по частоте в широком диапазоне длин волн 2.5–11 мкм (параметрических генераторов света). Такие источники являются важными составными частями оптических приборов и систем с новыми нетрадиционными функциями, имеющих большое прикладное значение [2]. Данные источники излучения среднего ИК-диапазона могут использоваться в различных областях науки и техники, таких как обработка материалов (стекло, керамика и полупроводников) с помощью технологий термораскола и скрайбирования [2]; зондирование атмосферы, дистанционное определение состава веществ и экологический мониторинг [3–5]; медицина (для диагностики заболеваний с помощью газоанализа и резонансной абляции биологических тканей [6, 7]) и др. Монокристаллы $ZnGeP_2$ используются для генерации суммарной и разностной частот и второй гармоники излучения СО- и СО₂-лазеров [8] в среднем ИК- и ТГц-диапазонах. На основе монокристалла $ZnGeP_2$ созданы наиболее мощные параметрические генераторы света в диапазоне длин волн 3.5–5 мкм со средней мощностью генерируемого излучения ~ 100 Вт, энергией импульса ~ 200 мДж, при длительности импульсов ~ 15 –30 нс с частотой следования импульсов ~ 100 Гц – 100 кГц [9–12]. Дальнейшее увеличение частотно-энергетических характеристик генерации параметрических генераторов света (ПГС) на основе мо-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-10193, <https://rscf.ru/project/23-79-10193/>). Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № Fwrm-2021-0014.

Физически-информируемые нейронные сети для оценки интенсивности атмосферной оптической турбулентности*

А.Ю. Шиховцев¹, А.В. Киселев¹, П.Г. Коваadlo¹

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Многие нейронные сети строятся по принципу «черного ящика», когда внутренняя структура модели не дает возможностей для физической интерпретации полученной модели. В настоящей работе демонстрируются методические основы для преодоления этой проблемы путем построения глубокой нейронной сети с учетом физических ограничений, налагаемых на функцию потерь. В частности, предложена и анализируется физически информируемая глубокая нейронная сеть, предсказывающая вариации трехминутных значений интенсивности оптической турбулентности в приземном слое атмосферы для места расположения Большого солнечного вакуумного телескопа. Модель нейронной сети позволяет оценивать интенсивность оптической турбулентности по средним метеорологическим характеристикам, а также учитывает вариации сглаженных во времени локальных величин внешнего масштаба турбулентности и вертикального турбулентного потока тепла.

Ключевые слова: *оптическая турбулентность, машинное обучение, физически информируемые нейронные сети.*

Введение

В последнее десятилетие значимое развитие получили технологии машинного обучения и нейронные сети, применяемые для решения различных задач [1–3]. Технологии машинного обучения используются в астропогодных и астроклиматических исследованиях [3], хотя и в весьма ограниченном объеме. Ранее глубокие нейронные сети были построены нами для оценки углового атмосферного разрешения (параметра, в англоязычной литературе обозначаемого как seeing) для Саянской солнечной обсерватории и Астрономической обсерватории Майданак. Отличительная особенность моделирования временных вариаций углового атмосферного разрешения для этих обсерваторий состоит в том, что нейронные сети обучались на длинных временных рядах. В частности, для Саянской солнечной обсерватории рассматривался период измерений, выполненных в ночное время с помощью дифференциального монитора дрожания изображения (известного как DIMM) с февраля 2012 г. по июль 2015 г., а для Астрономической обсерватории Майданак использовался еще более длинный ряд прямых измерений: с 1996 по 2003 г. и с 2018 по 2022 г. [4, 5].

Даже несмотря на то, что выбор входных переменных, задействованных в обучении, – это один из ключевых шагов для построения работоспособной нейронной сети и должен основываться на физических соображениях, уравнениях или их системе, многослойные нейронные сети имеют существенный недостаток. Модели таких сетей – это, по существу, «черный ящик». Их обучение опирается не сколько на научные теории и физику, а в основном на большие объемы данных и представляют собой результат их статистической обработки. Как отдельное направление, разрабатываемое и совершенствуемое в мире в последние годы, физически-информируемые нейронные сети (ФИНС) фокусируются на использовании конкретных уравнений, физических закономерностей в процессе обучения. В частности, функция потерь представляется более сложным образом, в виде суммы некоторого статистического члена, аналогично обычной нейронной сети, и аддитивной части, определяемой конкретным физическим соотношением, граничными и начальными условиями рассматриваемой физической задачи.

Одной из интересных задач, при решении которой применялась ФИНС, является оценка турбулентных потоков в окрестностях границы вода – воздух. В частности, отметим, что в работе [6] предложена новая схема параметризации турбулентного потока тепла, основанная на обученной ФИНС по данным измерений атмосферных характеристик. Авторами показано, что применение ФИНС позволяет существенно уменьшить среднее квадратическое отклонение потоков тепла, ~ 50%, в сравнении с классическими подходами. Также сравнительно более высокую точность

* Создание, программная реализация и анализ моделей физически информируемых нейронных сетей, предсказывающих интенсивность оптической турбулентности в приземном слое атмосферы, выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043 (<https://rscf.ru/project/24-72-10043/>) «Разработка методов диагностики характеристик нижней атмосферы с высоким разрешением в приложении к наземным астрономическим телескопам».

Воздействие электронного пучка на трансформацию фенола в воде в присутствии гуминовых веществ*

О.Н. Чайковская^{1,2}, Е.Н. Бочарникова^{1,2}, В.И. Соломонов¹, А.С. Макарова¹,
А.В. Спирина¹, С.А. Чайковский^{1,3}, И.В. Соколова²

¹ Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

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

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия

Электронные пучки импульсного ускорителя типа РАДАН со средней энергией 170 кэВ и измеритель спектров импульсной катодоллюминесценции в области от 350 до 900 нм, а также регистрация спектров поглощения и флуоресценции использовались для изучения трансформации фенола в воде в присутствии гуминовых веществ. С помощью этого пучка одновременно осуществлялись возбуждение катодоллюминесценции и радиолизное воздействие на водный раствор фенола. Степень трансформации исследуемых веществ определяли по анализу спектров люминесценции и поглощения облученного раствора. Исследование воздействия импульсного электронного пучка на водный раствор фенола в присутствии гуминовых веществ показало, что эффективность трансформации фенола в присутствии образца из смеси гуминовых и фульвокислот увеличивается в 2.6 раза по сравнению с водным раствором.

Ключевые слова: фенол, гуминовая кислота, импульсный электронный пучок, катодоллюминесценция, трансформация.

Введение

Фенол имеет многочисленные преимущества по сравнению с обычно используемыми арилгалогедами с точки зрения экологичности и устойчивости и применяется как прекурсор для производства высокоактивированных сульфонатных типов производных фенолов [1]. СО-связь является функциональной и основной для образования лигниновой биомассы из фенолов [2]. С другой стороны, фенол признан одним из широко распространенных антропогенных загрязнителей в окружающей среде. Он губителен для многих микроорганизмов, поэтому промышленные сточные воды с высоким содержанием токсиканта плохо поддаются биологической очистке. Источниками загрязнения водных объектов фенолами также являются стоки предприятий нефтеперерабатывающей, сланцеперерабатывающей, лесохимической, коксохимической, анилинокрасочной промышленности. Содержание фенолов в них может превышать 10–20 г/дм³ [3].

В настоящее время известны различные технологии очистки воды от фенола, такие как экстракция, выпаривание, озонирование, добавление окислителей, сорбция, электрокаталитическое гидрирование [4–7]. Дезинфекция воды во время разложения органических загрязнителей в усовершенствованных процессах окисления вызывает растущую обеспокоенность во всем мире из-за потенциального риска образования хлорированных побочных продуктов в условиях окружающей среды [8]. Признанным и наиболее эффективным способом является сорбция активированным углем, но высокая стоимость активированного угля, дорогостоящие и зачастую экологически опасные процессы его регенерации ограничивают использование этого способа. Анализ экологических показателей пяти различных технологий удаления фенола выявил, что степень очистки сточных вод является основным показателем эффективности. Экономический анализ технологий очистки показал, что процесс адсорбции является наиболее доступным и не требует затрат электроэнергии [9].

Другим эффективным методом для удаления органических соединений из воды может быть использование электронно-лучевого воздействия [10]. Плазмохимические процессы, протекающие при воздействии импульсного электронного пучка на органические соединения в воде, в том числе на границе раздела жидкость – воздух, изучены мало. При воздействии пучка возникают активные центры (свободные радикалы, ионы или возбужденные молекулы) и формируются условия, благоприятные для протекания цепных [11] и разветвленных цепных процессов в воздухе [12]. Допол-

* Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания ИЭФ УрО РАН (№ 124022200004-5).

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 621.31

DOI: 10.17223/00213411/68/5/10

Восстановление поля кольцевого магнита по данным измерений вектора индукцииЕ.Д. Вовченко¹, К.И. Козловский¹, А.П. Скрипник¹, А.Е. Шиканов¹¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

Описан алгоритм восстановления поля кольцевого магнита методом наименьших квадратов по данным измерения вектора индукции. Приведены результаты компьютерного эксперимента для определения поля кольцевого магнита, примененного в малогабаритном ионном диоде с лазерно-плазменным анодом для подавления электронной проводимости.

Ключевые слова: магнитное поле, кольцевой магнит, диод с магнитной изоляцией, индукции магнитного поля, расчетно-теоретическая модель.

Введение

При проектировании и анализе ряда технических устройств, содержащих постоянные магниты, часто требуется моделирование трехмерного распределения магнитного поля. Обычно для этого используется метод конечных элементов, позволяющий проводить расчеты для магнитов произвольной формы [1]. Для рассматриваемого в статье случая кольцевых магнитов наличие азимутально-симметричной геометрии позволяет заметно упростить процедуру определения картины магнитного поля, восстанавливая ее по данным измерения компонентов вектора индукции в конечном числе точек пространства. При этом обеспечивается возможность получения высокого уровня точности определения вектора индукции магнитного поля в произвольной точке пространства.

Кольцевые магнитные элементы широко применяются в ускорительной технике, например, в малогабаритных ускорительных трубках (УТ) для генерации нейтронов. В газонаполненных УТ они используются при создании продольного магнитного поля в ионном источнике Пеннинга [2–4], а в вакуумных УТ – для магнитной изоляции диодной системы [5]. Процесс проектирования подобных УТ требует наличия достоверной информации о пространственном распределении магнитного поля, которое имеет достаточно сложную структуру вблизи поверхности полюсов магнита.

В статье описан алгоритм восстановления азимутально-симметричного магнитного поля методом наименьших квадратов с использованием закона Био – Савара и экстраполяции данных измерения компонент вектора индукции B_r и B_z в отдельных точках пространства, доступных для размещения измерительного зонда. Рассмотрено конкретное применение данного алгоритма для определения поля кольцевого магнита, примененного в малогабаритном ионном диоде с лазерно-плазменным анодом для подавления его электронной проводимости [6].

Диод с магнитной изоляцией и лазерно-плазменным анодом

Схема ускорительного высоковольтного вакуумного диода с лазерно-плазменным источником дейтронов и магнитной изоляцией показана на рис. 1. Диод имеет коаксиальную геометрию электродов с внутренним анодом 1 и охватывающим его кольцевым магнитом 2, играющим роль катода. Дейтроны образуются в плазме, создаваемой при фокусировке на TiD-мишень импульсного излучения лазера, синхронизованного с ускоряющим напряжением ГИН Аркадьева – Маркса. Мишень расположена на аноде, изолированном от стенки вакуумной камеры 3 с помощью электрического ввода 4. Лазерное излучение вводится в вакуумную камеру через оптическое окно 5.

Расширяющаяся струя лазерной плазмы играет роль анода. Дейтроны, извлекаемые с ее боковой поверхности, ускоряются в радиальном направлении к катоду. Поле кольцевого магнита, на-

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 544.452.1

DOI: 10.17223/00213411/68/5/11

Особенности зажигания микрочастиц бурого угля лазерным излучением с различной структурой*Б.П. Адуев¹, И.Ю. Лисков¹, А.Ю. Митрофанов¹, Д.Р. Нурмухаметов^{1,2}¹ *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово, Россия*² *Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия*

Рассмотрены особенности зажигания углей с использованием различных режимов работы лазеров: непрерывного излучения иттербиевого лазера ($\lambda = 1070$ нм), импульсного излучения неодимового лазера ($\lambda = 1064$ нм), работающего в режиме свободной генерации ($\tau_n = 120$ мкс) и режиме модуляции добротности ($\tau_n = 12$ нс). Показано значительное различие в кинетических, спектральных и энергетических характеристиках зажигания микрочастиц бурого угля в трех использованных режимах.

Ключевые слова: лазерное излучение, уголь, зажигание, горение, кинетика свечения, нестационарная спектроскопия пламени.

Введение

Лазерное излучение получило практическое применение для воздействия на энергетические материалы, например, для инициирования светочувствительных оптических детонаторов штатных взрывчатых веществ [1], определения состава минеральных включений в различных марках углей с использованием метода лазерной искровой спектроскопии (LIBS) [2, 3]. В перспективе лазерное излучение может быть применено для розжига топлива в котлах без применения мазута, как это осуществляется с помощью плазмотрона [4, 5].

Лазерное излучение применяется для исследования характеристик инициирования химических реакций в энергетических материалах, например, таких как тетранитропентаэритрит, гексоген [6] или ископаемые угли [7, 8].

Используются как лазеры непрерывного действия (преимущественно CO_2 [9, 10], полупроводниковые [11, 12]), так и импульсные лазеры (преимущественно неодимовые и рубиновые) [13–15].

Применение импульсных лазеров в сочетании с регистрирующей времяразрешающей оптико-электронной аппаратурой позволяет изучать процессы на начальных стадиях и делать выводы о механизмах зажигания энергетических материалов [8].

В литературе рассматриваются характеристики зажигания углей различными типами лазеров без учета особенностей структуры лазерного излучения, что может привести к неоднозначной интерпретации результатов.

В связи с этим в настоящей работе рассмотрены различия в характеристиках зажигания микрочастиц углей на примере угля марки 2Б лазерами непрерывного действия и импульсными лазерами, работающими в режимах свободной генерации и модулированной добротности.

1. Образцы и методика**1.1. Материалы**

Зажигание частиц углей лазерами различных типов будет рассмотрено на примере бурого угля (марка Б, группа 2Б).

Процедура подготовки образцов состояла в следующем. Крупные куски угля при помощи пестика измельчались в ступке, затем производился помол в шаровой мельнице АГО-2, просеивание через сита с различным размером ячеек. Фракция с размером $d \leq 200$ мкм отбиралась для технического анализа, фракция с размерами $d \leq 63$ мкм – для изготовления экспериментальных образцов.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ УУХ СО РАН (проект № 124041100056-6).

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 5

Адрес редакции и издателя:
634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,
Томский государственный университет,
редакция журнала «Известия вузов. Физика»

Старший редактор *Л.А. Пивоварова*
Выпускающий редактор *Л.В. Пермякова*
Редактор-переводчик *И.А. Бобровникова*
Оригинал-макет *Д.В. Фортеса*

Подписано к печати 13.05.2025. Выпуск в свет 23.05.2025. Заказ № 6335.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.63. Уч.-изд. л. 13.02. Тираж 50 экз. Цена свободная.

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

