

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ

ФИЗИКА

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

6·2023

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 66

Июнь, 2023

№ 6 (787)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Ищенко А.Н., Дьячковский А.С., Шестопалова А.С., Саммель А.Ю., Чупашев А.В. Некоторые особенности подводного старта суперкавитирующих ударников из канала баллистической установки 5

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Степанов Н.П., Грабко Г.И. Закономерности изменения интенсивности поляризационно-релаксационных процессов в поликристаллических слоях Pb_3O_4 в зависимости от напряженности электрического поля и температуры 11
- Теуцкая Е.Е., Копытов Г.Ф., Барышев М.Г. Генотоксическое действие ионизирующих излучений и переменного магнитного поля 22
- Ахундова Н.М., Алиева Т.Д. Влияние термообработки на термоэлектрические свойства кристаллов твердого раствора $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ со сверхстехиометричным свинцом 29
- Гынгазов С.А., Васильев И.П., Клишин А.П., Гынгазов А.С., Шевелев С.А. Влияние добавки оксида висмута на спекание циркониевой керамики при пониженном давлении прессования компактов 36

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Касумова Р.Дж. Фазовая само- и кросс-модуляции в метаматериалах при четырехволновом смещении 45
- Баалбаки Х.А., Юдин Н.А. Накачка активной среды лазера на парах меди LC-генератором с инвертированием напряжения на накопительных конденсаторах 58

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Зарипов Р.Г. Эволюция мер Реньи при самоорганизации открытых систем в расширенной парастатистике 66
- Алиева Т.Г., Кулиева Г.Г., Годжаева М.В., Гурбанова Н.Н. Аналитическое решение уравнения Клейна – Фока – Гордона для суммы потенциалов Хюльтена и типов Юкавы 73

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Семенюк Н.С., Коковин А.О. Электродинамический механизм ускорения ионов в начальной стадии вакуумного пробоя 83
- Дейчули М.П., Кошелев В.И., Петкун А.А., Чазов В.А. Синхронизация электромагнитных резонансов в терагерцовом черенковском генераторе 92
- Эфендиева Т.Н., Эфендиев К.А. Влияние ультрафиолетового облучения на пробой газов 104

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Горшков Д.В., Закиров Е.Р., Сидоров Г.Ю., Сабинина И.В., Гутаковский А.К., Вдовин В.И. Исследование свойств пленок HfO_2 , выращенных методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения при разных температурах роста 111

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

- Симахин В.А., Шаманаева Л.Г., Маер А.В. Робастные непараметрические датчики случайных величин 120

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Михайлов М.М., Юрьев С.А., Лапин А.Н., Горончко В.А., Утебеков Т.А. Радиационная стойкость оптических свойств порошка диоксида циркония, модифицированного наночастицами диоксида церия 133

CONTENTS

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Ishchenko A.N., Dyachkovskii A.S., Shestopalova A.S., Sammel A.Y., Chupashev A.V.** Some features of the underwater launch of supercavitating strikers from a ballistic gun 5

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Stepanov N.P., Grabko G.I.** Regularities of change in the intensity of polarization-relaxation processes in polycrystalline Pb_3O_4 layers depending on the electric field strength and temperature 11
- Tekutskaya E.E., Kopytov G.F., Baryshev M.G.** Genotoxic effect of ionizing radiation and alternating magnetic field 22
- Akhundova N.M., Aliyeva T.C.** Effect of heat treatment on the thermoelectric properties of crystals of $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ solid solution with superstoichiometric lead 29
- Ghyngazov S.A., Vasil'ev I.P., Klishin A.P., Gyngazov A.S., Shevelev S.A.** Influence of bismuth oxide addition on sintering of zirconium ceramics under reduced pressing pressure of compacts 36

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Kasumova R.J.** Self- and cross-phase modulations in metamaterials at four-wave mixing 45
- Baalbaki H.A., Yudin N.A.** Pumping of copper vapor laser by an LC-generator with voltage inversion on storage capacitors: the process of inversion formation 58

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Zaripov R.G.** Evolution of Renyi measures during self-organization of open systems in extended parastatistics 66
- Aliyeva T.H., Kuliyeva G.G., Gojajeva M.V., Gurbanova N.N.** Analytical solution of the Klein–Fock–Gordon equation for the linear combination of the Hulthén and the Yukawa-type potentials 73

PLASMA PHYSICS

- Kozhevnikov V.Yu., Kozyrev A.V., Semeniuk N.S., Kokovin A.O.** Electrodynamic mechanism of ion acceleration in initial stage of vacuum breakdown 83
- Deichuly M.P., Koshelev V.I., Petkun A.A., Chazov V.A.** Synchronisation of electromagnetic resonances in terahertz Cherenkov generator 92
- Efendieva T.N., Efendiev K.A.** The influence of irradiation on the breakdown of gas 104

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Gorshkov D.V., Zakirov E.R., Sidorov G.Yu., Sabinina I.V., Gutakovskiy A.K., Vdovin V.I.** Studying the properties of HfO_2 films grown by plasma-enhanced atomic layer deposition at different growth temperatures 111

MATHEMATICAL PROCESSING OF PHYSICS EXPERIMENTAL DATA

- Simakhin V.A., Shamanaeva L.G., Maer A.V.** Robust nonparametric generators of random variables 120

BRIEF COMMUNICATIONS

- Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapin A.N., Goronchko V.A., Utebekov T.A.** Radiation stability of optical properties of zirconium dioxide powder modified with cerium dioxide nanoparticles 133

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.582, 623.98

DOI: 10.17223/00213411/66/6/1

Некоторые особенности подводного старта суперкавитирующих ударников из канала баллистической установки*А.Н. Ищенко¹, А.С. Дьячковский¹, А.С. Шестопалова¹,
А.Ю. Саммель¹, А.В. Чупашев¹¹ Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Представлены экспериментально-теоретические результаты исследования начального этапа высокоскоростного движения суперкавитирующих ударников при подводном старте. Получены профили каверн, формируемых при подводном старте суперкавитирующих ударников с различными формами кавитаторов в диапазоне начальных скоростей 300–400 м/с. Полученные результаты использовались для верификации численной методики расчетов, с помощью которой проведено численное моделирование процесса подводного выстрела ударником.

Ключевые слова: суперкавитация, вода, подводный выстрел, суперкавитирующий ударник, движение в различных средах.

Введение

В процессе высокоскоростного движения твердых тел в воде возможна реализация условий, при которых режим сплошного обтекания нарушается с образованием пузырьков или полостей (каверн), уменьшающих площадь поверхности взаимодействия тела с потоком жидкости [1]. На практике достижимы условия, позволяющие погрузить весь корпус движущегося тела в каверну, за исключением небольшой поверхности в передней части тела, называемой кавитатором. В таком случае поверхность взаимодействия тела с потоком жидкости сокращается и сопротивление движению со стороны воды кратно уменьшается, позволяя инертным телам преодолевать существенные расстояния в воде. В невозмущенной жидкости при окружающем давлении, близком к атмосферному, и скоростях движения ударника, составляющих сотни метров в секунду, длина суперкаверны может во много раз превышать длину движущегося в ней ударника и составлять десятки метров [2, 3]. Несимметричная форма профиля суперкаверны в ее головной части (равной длине ударника) может привести к отклонению ударника от первоначальной траектории и даже потере устойчивости, так как стабилизация обеспечивается глиссированием кормы ударника внутри полости [4].

На базе гидробаллистического комплекса НИИ ПММ ТГУ проводятся исследования движения твердых тел (ударников) в различных средах в диапазоне скоростей старта 200–3500 м/с, в том числе и в воде [5]. В настоящее время на базе гидробаллистического стенда достигается устойчивое суперкавитирующее движение ударников в воде при скоростях до 1564 м/с [6]. Исследования в основном сосредотачивались на выяснении внешнетраекторных параметров движения суперкавитирующих ударников, их устойчивости и бронепробиваемости в отрыве от условий его старта. Постановка эксперимента предполагала метание в вакуум с последующим входом ударников в воду через тонкие мембраны. Дальнейшее развитие проекта потребовало осуществить горизонтальное метание из ствола пороховой баллистической установки, погруженной в воду на глубину 0.25 м. Подводный старт из канала баллистической установки сопровождается выбросом горячих продуктов сгорания метаемого состава в окружающее пространство под большим давлением, что может привести к возмущениям в картину протекающих процессов.

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0032.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 537.31

DOI: 10.17223/00213411/66/6/2

Закономерности изменения интенсивности поляризационно-релаксационных процессов в поликристаллических слоях Pb_3O_4 в зависимости от напряженности электрического поля и температуры*Н.П. Степанов¹, Г.И. Грабко¹¹ *Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия*

Проведено исследование временных зависимостей величины тока, протекающего через поликристаллический слой Pb_3O_4 , в зависимости от напряженности электрического поля и температуры. Полученные данные использованы для выявления закономерностей изменения интенсивности поляризационно-релаксационных процессов. Установлено, что увеличение одновременного воздействия температуры и электрического поля на сэндвич-структуры на основе поликристаллических слоев Pb_3O_4 сопровождается замедлением как быстрой, так и медленной стадий кинетики темного тока. Обсуждаются механизмы наблюдаемых эффектов.

Ключевые слова: оксид свинца, релаксационно-поляризационные процессы, локализованные состояния, время релаксации, эстафетный механизм переноса заряда.

Введение

Интерес к исследованию материалов оксидной системы Pb–O обусловлен ее востребованностью при использовании как в промышленной сфере при производстве оптических, радиационно-защитных стекол, антикоррозионных красок, взрывчатых веществ, так и в области оптоэлектроники для изготовления фоторезисторов, мишеней видеоконвекторов, фотовольтаических ячеек солнечных элементов [1–3]. С другой стороны, в настоящее время ортоплюмбат свинца Pb_3O_4 рассматривается и как модельный объект для изучения диэлектрических и фотодиэлектрических характеристик металлооксидных соединений сходной структуры ($MgSb_2O_4$, Fe_3O_4 , $MgAl_2O_4$). Актуальность такого рода исследований обусловлена, прежде всего, экспериментальными данными о пиро- и сегнетоэлектрических свойствах Pb_3O_4 [4]. Более того, наблюдается повышенный интерес к разработке моделей, позволяющих объяснить влияние свинецсодержащей оксидной фазы, образующейся в наноструктурных пленках, изготавливаемых методом термической активации в атмосфере кислорода, на физические свойства халькогенидов свинца [5–12], которые исследуются в целях повышения эффективности существующих инфракрасных фотоприемников. В частности, актуальной является и задача расширения их диапазона в коротковолновой области инфракрасного спектра, что перспективно для развития техники, используемой при мониторинге атмосферы, земной поверхности, предотвращения чрезвычайных ситуаций [13, 14].

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным всестороннее изучение электрофизических свойств и, в частности, поляризационно-релаксационных процессов в пленочных структурах на основе классического представителя свинецсодержащих оксидных систем – ортоплюмбата свинца Pb_3O_4 , происходящих под воздействием различных внешних факторов. Именно поляризационные и зарядовые явления оказывают существенное влияние на режим функционирования большинства полупроводниковых приборов, в том числе ИК-фотоприемников, определяя условия создания потенциального рельефа на поверхности фоточувствительных слоев. Одним из эффективных экспериментальных методов, позволяющих устанавливать механизмы данных процессов в высокоомных полупроводниках, а также анализировать закономерности проводимости и особенности энергетического спектра локализованных состояний этих материалов, является метод изотермической токовой релаксации [15–22].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20055, <https://rscf.ru/project/22-22-20055/>, при финансовой поддержке со стороны правительства Забайкальского края.

Генотоксическое действие ионизирующих излучений* и переменного магнитного поля

Е.Е. Текуцкая¹, Г.Ф. Копытов², М.Г. Барышев³

¹ Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия

² Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Россия

³ Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, Московская область, р.п. Большие Вяземы, Россия

Изучены механизмы повреждения структуры ДНК, выделенной из цельной крови человека, после воздействия на образцы крови различных видов ионизирующего излучения и переменного магнитного поля. Сделан вывод о том, что появление окислительных повреждений азотистых оснований и одонитевых разрывов в молекуле ДНК лимфоцитов вызвано образованием активных форм кислорода в водной среде, которые генерируются при воздействии *in vitro* магнитным полем, γ -, СВЧ-излучениями и лазерным излучением на образцы крови.

Ключевые слова: переменное магнитное поле, ионизирующее излучение, 8-гидрокси-2-деоксигуанозин, одонитевые разрывы ДНК, активные формы кислорода.

Введение

Частыми проявлениями стресс-реакции в клетках являются повреждения биологически значимых молекул и, прежде всего, ДНК. Нарушение или недостаточность процессов репарации и возникающие при этом мутации могут иметь катастрофические последствия [1]. Известно, что электромагнитное поле (ЭМП) может наносить клеткам в целом и молекулам ДНК в частности структурные и окислительные повреждения, вызванные образованием активных форм кислорода (АФК), изменением процессов репарации ДНК и другими процессами. При воздействии ЭМП на крупные молекулы происходит их переориентация, при этом внутренняя структура может измениться или даже разрушиться [2–5]. В работах [2, 4] было показано, что при воздействии на водные растворы ДНК, выделенной из периферической крови человека, ЭМП в растворах происходит образование АФК. Именно образование АФК может приводить к повреждению первичной структуры ДНК [1] и накоплению окисленных азотистых оснований, в частности, 8-гидрокси-2-деоксигуанозина (8-ОНдГ), а в дальнейшем – к появлению одонитевых разрывов (ОР) в сахарофосфатном остове ДНК. Хорошо известно, что электромагнитное излучение имеет электрическую и магнитную составляющие. Большое влияние на клетки производит именно электрическое поле, комбинированное с магнитным полем (МП), которое проникает в биологические ткани практически без искажений [6–9]. ЭМП низкой частоты способствует образованию большого количества перекисей и радикалов, влияющих на количество ОР [7]. Показано влияние магнитной составляющей ЭМП на вероятность образования пероксидрадикалов в биологических системах. Данную взаимосвязь многие авторы [2, 3, 8–10] объясняют возможностью ЭМП изменять скорость химических реакций, определяющих рост клеток и кодирование генетической информации. Вихревые электрические поля, превышающие установленный уровень, вызывают электрический пробой биологических мембран [6, 9]. Электрические поля создают колебательную силу на каждый свободный ион с обеих сторон мембраны, при этом движение ионов вызывает ухудшение состояния ионных каналов на мембране, ее биохимические изменения и нарушения всех клеточных функций [10, 11]. Это влечет за собой локальные нарушения метаболизма клетки и запускает комплекс неспецифических защитных реакций, направленных на восстановление гомеостаза. Особенно актуальными являются исследования воздействия на внутримолекулярные процессы в клетках ЭМП промышленных частот [6], так как они повсеместно присутствуют в повседневной жизни современного человека.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 20.1/119.

УДК 621.315.592

DOI: 10.17223/00213411/66/6/4

Влияние термообработки на термоэлектрические свойства кристаллов твердого раствора $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ со сверхстехиометричным свинцом

Н.М. Ахундова¹, Т.Д. Алиева²¹ *Азербайджанский государственный экономический университет, г. Баку, Азербайджанская Республика*² *Институт физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика*

Термоэлектрические свойства монокристаллов твердого раствора $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ со сверхстехиометричным свинцом до 1.0 ат.%, полученные методом Бриджмена, были исследованы до и после отжига при 673 и 773 К в интервале ~ 90–300 К. Показано, что избыточные атомы Pb и отжиг существенно изменяют значения и температурные зависимости электрических параметров и теплопроводности, а также термоэлектрическую эффективность изученных кристаллов. Выявленные изменения кинетических параметров кристаллов связываются донорными действиями Pb в них и залечиванием возникающих в образцах при их получении структурных дефектов с отжигом.

Ключевые слова: *твердый раствор, монокристалл, термоэлектрические свойства, структурные дефекты, отжиг.*

Введение

Твердые растворы систем PbTe–SnTe являются одними из наилучших среднетемпературных термоэлектрических материалов и полупроводниками с малой шириной запрещенной зоны, фоточувствительными в инфракрасной области спектра [1–5]. Однако применение этих материалов в некоторых случаях ограничивается из-за высокой концентрации носителей тока в них, связанных, в основном, существованием в этих кристаллах электрически активных катионных и анионных вакансий [2, 6, 7].

Соединения PbTe и SnTe и их твердые растворы кристаллизуются в кубическую гранецентрированную решетку типа NaCl с отклонением от стехиометрии и содержат электроактивные вакансии металла и теллура с концентрацией, достигающие $\sim 10^{18}$ – 10^{19} см⁻³ [1, 2, 6, 8]. Выяснено, что легирование твердых растворов систем PbTe–SnTe рядом примесей может вызвать стабилизацию уровня Ферми [9–11]. Например, для составов с 21–29 мол.% SnTe уровень Ферми оказывается стабилизированным в запрещенной зоне, что приводит к их полуизолирующему состоянию [10], структуры обладают значительной фоточувствительностью вплоть до субтерагерцового диапазона [4, 12, 13]. Также выяснено, что концентрацию катионных вакансий в кристаллах теллуридов свинца и олова удается изменять введением в состав сверхстехиометричных Pb и Sn [14–16]. Эти соединения имеют сложную валентную зону. Структура валентной зоны и температурная зависимость ширины запрещенной зоны в твердых растворах $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с $x < 0.4$ такие же, как в PbTe [1, 2]. Твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xTe$ имеют широкую область гомогенности в сторону избытка Te [17]. Постоянная решетки a в зависимости от x плавно меняется от a у чистого PbTe до a у SnTe, а температура плавления – соответственно от 922 до 800 °С [1, 2, 6, 8]. Поэтому можно предполагать, что концентрация носителей тока в них также может быть изменена за счет внедрения сверхстехиометричного металла или халькогена. Электрические параметры кристаллов этих материалов определяются также и структурными дефектами, возникающими, в основном, при выращивании, изготовлении образцов для экспериментов и т.д. Такие структурные дефекты в кристаллах в большинстве случаев залечиваются термообработкой в определенном режиме [6, 8, 18, 19].

В данной работе с целью выяснения вопроса о возможности управления термоэлектрическими свойствами твердого раствора $Pb_{0.75}Sn_{0.25}Te$ с помощью введения сверхстехиометричного свинца и режима термообработки выращены монокристаллы данного состава с избытком до 1.0 ат.% Pb и исследованы их электропроводность σ , коэффициенты термоЭДС α и теплопроводности χ в интервале температур ~ 90–300 К до и после отжига при 673 и 773 К в атмосфере аргона в течение 120 ч.

Влияние добавки оксида висмута на спекание циркониевой керамики при пониженном давлении прессования компактов*

С.А. Гынгазов¹, И.П. Васильев¹, А.П. Клишин²,
А.С. Гынгазов³, С.А. Шевелев¹

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

² *Томский государственный педагогический университет, г. Томск, Россия*

³ *АО «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический кабельный институт (НИКИ)», г. Томск, Россия*

Исследовано влияние легкоплавкой добавки оксида висмута на процессы консолидации наночастиц частично стабилизированного диоксида циркония в компактах, полученных при давлениях прессования 1, 50 и 800 кг/см². Показано, что при давлении прессования ≤ 50 кг/см² плотность прессовок по величине сравнима с насыпной плотностью. Установлено, что введение легкоплавкой добавки способствует получению керамики из компактов пониженной плотности, полученных при давлении от 1 до 50 кг/см². При давлении прессования ≥ 50 кг/см² наличие добавки способствует получению керамики с плотностью ≥ 5.8 г/см³. Добавка оксида висмута формирует прослойки, расположенные вдоль границ порошка частично стабилизированного диоксида циркония. Наличие добавки в керамике вследствие фазовых трансформаций при изменении температуры приводит к трещинообразованию преимущественно по границам зерен. Для малых давлений прессования наблюдается уменьшение пористости и увеличение плотности и среднего размера зерна по мере увеличения давления прессования и содержания легкоплавкой оксидной добавки. Результаты исследований имеют важное значение для развития новых технологий 3D-печати керамики.

Ключевые слова: диоксид циркония, оксид висмута, уплотнение компактов, насыпная плотность.

Введение

Керамические материалы в силу их химической стойкости, высоких прочностных характеристик находят широкое применение при изготовлении конструкционных и функциональных материалов [1, 2]. Часто их используют как альтернативу применению металлов и сплавов [3]. Для придания заданной формы изделиям, как правило, требуется проведение дополнительной обработки исходной заготовки. Для керамических изделий, обладающих феноменальной твердостью и прочностью, такая обработка встречает большие трудности. Поэтому создание керамических изделий сложной формы традиционными методами спекания и обработки практически невозможно. Решение этой проблемы наметилось с развитием технологии 3D-печати. Впервые она была применена для печати изделий из пластмассы [4]. Простота и удивительная точность в воспроизведении сложных форм изделий вдохновили разработчиков на использование 3D-печати изделий из металлов и сплавов [5, 6]. Существенные результаты получены и для 3D-печати керамики [7–9], которая находится на стадии становления. Имеющиеся 3D-принтеры и технологии печати, реализуемые на них, характеризуются высокой длительностью процессов изготовления сырой заготовки, последующего ее отжига и спекания керамики [10, 11]. Независимо от типа принтера в исходную порошковую массу добавляют различного типа связующие добавки, например, светоотверждаемые составы [12–14], органические материалы и пластмассы [15, 16] и т.д. Используемые при 3D-печати связующие предназначены для облегчения процесса формирования сырой заготовки заданной сложной формы. Для удаления связующего необходимо проводить длительный отжиг сырой заготовки при температуре, заметно меньшей температуры спекания керамики [17]. После данного отжига заготовка представляет собой высокопористое тело [18]. Для удаления пор проводят спекание при соответствующей температуре в течение длительного времени. Альтернативой данной технологии может служить использование лазерного излучения, посредством воздействия которого проводят послойную наплавку керамического порошка [19]. Наряду с несомненными преимуществами данная технология применительно к керамике имеет недостатки, в частности, эта технология предполагает доведение порошкового слоя до температуры плавления. При этом могут быть проблемы с формообразованием керамики. Частично этот недостаток может быть устранен

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSWW-2023-0011).

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 530.145

DOI: 10.17223/00213411/66/6/6

Фазовая само- и кросс-модуляции в метаматериалах при четырехволновом смещении

Р.Дж. Касумова¹¹ *Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика*

При четырехволновом смещении с участием сильных лазерных полей изучены эффекты само- и кросс-взаимодействия в кубичной среде метаматериала, являющейся «левой» для сигнальной волны. Анализ проведен в приближении заданной интенсивности. Показано, что при нелинейно-оптическом процессе преобразования частоты интенсивной световой волны в метаматериале влияние эффектов само- и кросс-модуляции в мощном поле лазерного излучения приводит к изменению условий возбуждения сигнальной волны четырехволнового смещения. Согласно полученным в работе аналитическим выражениям, выбор оптимальных параметров задачи позволяет реализовать режим эффективного преобразования частоты. В такой структуре, варьируя интенсивности накачки и холостой волны, линейную фазовую отстройку и полную длину метаматериала, можно контролировать и управлять интенсивностью выходного когерентного излучения. Приведены численная оценка эффективности процесса преобразования в метаматериале и сравнение с результатами эксперимента. Демонстрируется, что эффекты само- и кросс-модуляции в средах с отрицательной рефракцией могут быть использованы как мощный инструмент для разработки преобразователей частоты в подобных средах.

Ключевые слова: *четырёхволновое смещение, метаматериал, металлические наночастицы, само- и кросс-взаимодействие, приближение заданной интенсивности.*

Введение

В настоящее время развитие высоких технологий, прогресс в нанотехнологиях диктуют необходимость в оптических устройствах наномасштаба. Это ставит перед разработчиками задачу поиска новых подходов к конструированию таких искусственных структур, как метаматериалы. Стало возможным создание периодических структур, характерные размеры которых порядка длины волны оптического диапазона [1, 2]. Одним из актуальных подходов является использование двумерных метаповерхностей, которые можно создать литографическим способом (soft nanoimprint lithography). Обнаружен ряд полезных свойств двумерных наноструктур, которые можно будет применить в будущем для создания оптических приборов [3]. Другой подход связан с обнаруженным фактом концентрации сильного электрического поля вокруг золотых и серебряных наночастиц, введенных в диэлектрическую структуру, что привело к созданию наноплазмоники [4, 5]. Если в конструкции Пендри электрическими «атомами» являются металлические стержни, то металлические расщепленные кольца выполняют роль магнитных «атомов». В метаматериалах наноплазмоники роль «атомов» играют плазмонные наночастицы. Под последним понимаются колебания свободных электронов, которые перемещаются относительно неподвижной кристаллической решетки. Сильный собственный нелинейный отклик частиц золота и серебра делает их привлекательными для наноплазмоники. Для золотой наночастицы диэлектрической структурой выбирается кремний, из-за малой работы выхода электрона из золота в кремний. Интенсивное излучение металлических наночастиц наблюдается при локализованном плазмонном резонансе, когда частота коллективных колебаний электронов проводимости совпадает с частотой импульсов падающей электромагнитной волны. Это объясняется сильным нелинейным откликом металлических наночастиц при резонансе, что можно использовать для увеличения на несколько порядков существующего собственного нелинейного отклика частиц золота и серебра [6, 7]. Как показывают исследования по применению наночастиц в биомедицинских анализах, излучение от наночастиц золота и серебра можно регистрировать простой оптической аппаратурой, не требующей высокой чувствительности, по эффективности работы одна подобная частица заменяет 10^5 флуоресцентных

Накачка активной среды лазера на парах меди ЛС-генератором с инвертированием напряжения на накопительных конденсаторах

Х.А. Баалбаки¹, Н.А. Юдин^{1,2}

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

² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследован электрофизический процесс в разрядном контуре лазера на парах меди (ЛПМ) при накачке ЛС-генератором с инвертированием напряжения на накопительных конденсаторах. Показано, что накачка активной среды ЛПМ осуществляется в два этапа. На первом (подготовительном) этапе происходит зарядка емкостных составляющих разрядного контура лазера от накопительных конденсаторов, а на втором – непосредственно накачка активной среды. Переход от подготовительного этапа к этапу накачки осуществляется в результате «пробоя». Низкая эффективность накачки активной среды обусловлена тем, что «пробой» реализуется в процессе инвертирования напряжения на накопительных конденсаторах. Рассмотрены технические решения по повышению эффективности накачки активной среды ЛПМ.

Ключевые слова: *лазер на парах меди, пробой, эффективность накачки.*

Введение

Лазер на парах меди (ЛПМ) и CuVg-лазер широко используются в медицине для лечения кожных и сосудистых заболеваний и косметологии [1–3], в лазерных мониторах [4, 5] благодаря энергетическим характеристикам лазерного излучения, а также для разделения изотопов [6] и для других применений. Поэтому улучшение характеристик ЛПМ в настоящее время является актуальной задачей.

Во многих работах, например [7–9], были представлены результаты исследований влияния элементов и параметров схемы накачки на выходные характеристики излучения, поскольку электрофизические процессы играют решающую роль в определении начальных условий накачки активной среды лазера на парах меди, помимо их роли в релаксационных процессах в период между импульсами возбуждения.

Для эффективной накачки активной среды ЛПМ необходимо формировать импульс возбуждения с крутым фронтом тока и длительностью, соизмеримой со временем существования инверсной населенности [10], что указывает на определяющую роль электрофизического процесса в формировании инверсии при газоразрядной накачке. Как показали исследования [11–15], формирование инверсии населенности в газоразрядных трубках (ГРТ) с электродами, расположенными в холодных буферных зонах (ХБЗ), осуществляется после «пробоя». При этом наблюдается нарастание напряжения на ГРТ и тока в контуре (фантомный ток) до момента «пробоя», но не наблюдаются процессы ионизации и возбуждения в активной среде [11]. Для эффективной накачки необходимо, согласно [14, 15], чтобы разряд имел все признаки нетермического дугового разряда с низким катодным падением потенциала, что реализуется при термоэлектронной эмиссии с катода ГРТ. Расположение электродов в ХБЗ, где газовая температура $\sim 450\text{--}600\text{ К}$, обуславливает возможность быстрого охлаждения катодного пятна на электроде (после импульса возбуждения) из-за высокой теплопроводности материала катода. Следовательно, на начальном этапе накачки в таких конструкциях ГРТ осуществляется разогрев катодного пятна до температуры, при которой возникает термоэмиссия. Как показали исследования [14, 15], на начальном этапе накачки осуществляется зарядка обостряющего конденсатора C_0 от накопительного конденсатора и в индуктивности разрядного контура L_k запасается энергия, когда зарядный ток в контуре нарастает. При этом в ГРТ зажигается тлеющий разряд. Сброс энергии, запасенной в L_k , должен обеспечивать процесс дальнейшей зарядки C_0 . Однако параллельно C_0 подключена ГРТ. Из курса общей физики известно, что время сброса энергии, запасенной в индуктивности L на сопротивление R , $\sim L/R$. Именно данный процесс обеспечивает разогрев катодного пятна, определяет момент «пробоя» и начало накачки активной среды.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 536.75

DOI: 10.17223/00213411/66/6/8

Эволюция мер Реньи при самоорганизации открытых систем
в расширенной парастатистикеР.Г. Зарипов¹¹ Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение
ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Россия

Рассматриваются изменения параметрической энтропии и информации различия Реньи при вынужденных переходах между стационарными состояниями в пространстве управляющих параметров в процессе самоорганизации открытых систем в расширенной парастатистике. Доказываются S - и I -теоремы об изменениях мер Реньи при условии Гиббса для «эффективной» энергии.

Ключевые слова: энтропия, информация различия, самоорганизация, расширенная парастатистика.

Введение

В настоящее время параметрические меры энтропии и информации различия с негиббсовыми распределениями находят все большее применение в аномальных физических процессах. Выбор тех или иных мер зависит от математических моделей рассматриваемых задач. Различные подходы, идеи и методы в классическом и квантовом случаях изложены в [1–3]. Особый интерес представляют собой меры Реньи

$$S_q = \frac{k}{1-q} \ln \left(\sum_i^m p_i^q \right), \quad (1)$$

$$I_q = \frac{k}{q-1} \ln \left(\sum_i^m p_i^q u_i^{1-q} \right) \geq 0, \quad \sum_i^m p_i = \sum_i^m u_i = 1, \quad (2)$$

зависящие от параметра $q > 0$ с нормированными распределениями. Энтропия (1) широко используется при исследованиях мультифракталов [4], где параметр q связан с фрактальной размерностью, в хаотических системах [5] и других различных моделях. При усреднении применяется нормированное «сопровождающее» распределение (escort distribution)

$$f_i = \frac{p_i^q}{\sum_i^m p_i^q}, \quad \left(\sum_i^m f_i = 1 \right). \quad (3)$$

Математически строгий вывод мер (1) и (2) с дискретным распределением при аксиоматическом подходе приводится в фундаментальной работе [6] по статистической теории информации, и результаты обобщены в [7]. Важным свойством является аддитивный закон композиции мер в соответствующих группах мер

$$S_q = S_{1q} \circ S_{2q} = S_{1q} + S_{2q}, \quad I_q = I_{1q} \circ I_{2q} = I_{1q} + I_{2q} \quad (4)$$

с $p_i = p_{i1} p_{i2}$ и $u_i = u_{i1} u_{i2}$ для независимых систем.

В пределе $q \rightarrow 1$ из (1) и (2) вытекает энтропия Больцмана – Гиббса – Шеннона и информация различия Кульбака – Лейблера [8, 9]:

$$S = -k \ln \sum_i^m p_i \ln p_i, \quad (5)$$

$$I = k \ln \sum_i^m \left(p_i \ln \frac{p_i}{u_i} \right) \geq 0. \quad (6)$$

Равенство в (2) и (6) достигается тогда и только тогда, когда $p_i = u_i$.

УДК 530.145.85

DOI: 10.17223/00213411/66/6/9

Аналитическое решение уравнения Клейна – Фока – Гордона для суммы потенциалов Хюльтена и типов Юкавы

Т.Г. Алиева¹, Г.Г. Кулиева², М.В. Годжаева³, Н.Н. Гурбанова⁴

¹ *Институт физических проблем Бакинского государственного университета, г. Баку, Азербайджанская Республика*

² *Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика*

³ *Институт физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика*

⁴ *Институт физики университета Этвоша Лорана, г. Будапешт, Венгрия*

Найдено аналитическое решение для связанных состояний модифицированного уравнения Клейна – Фока – Гордона для новой предполагаемой суммы потенциалов Хюльтена и типов Юкавы. Получены аналитические выражения для собственного значения энергии и соответствующих радиальных волновых функций для произвольного значения орбитального квантового числа $l \neq 0$. Собственная функция была выражена через гипергеометрические функции. Показано, что уровни энергии и собственные волновые функции очень чувствительны к выбору потенциальных параметров. С помощью аналитических формул для собственного значения энергии и соответствующей радиальной волновой функции были рассмотрены несколько частных случаев.

Ключевые слова: уравнение Клейна – Фока – Гордона, потенциалы Хюльтена и типы Юкавы, метод Никифорова – Уварова.

Введение

Квантовая механика за продолжительный период времени переросла из передовой теории в отдельную область физики. В ней до сих пор важным является изучение точно решаемых задач для физических потенциалов [1, 2].

Потенциальные модели в рамках релятивистской и нерелятивистской квантовой механики всегда играли и будут играть важную, может быть и основную, роль в исследованиях областей физики ядра и элементарных частиц, а также физики атомов и молекул. В потенциальных моделях физические свойства микрообъектов описываются и интерпретируются с помощью различных волновых уравнений, например, уравнения Шредингера, уравнения Клейна – Фока – Гордона (КФГ), релятивистского конечно-разностного уравнения и уравнения Дирака [1, 2]. При этом используются точные или феноменологически введенные потенциалы взаимодействия. Таких потенциалов немало. Самыми известными потенциалами, широко применяемыми как в релятивистской, так и в нерелятивистской областях, являются потенциалы Морса, Эскарта, Маннинга – Розена, Хюльтена, Вуда – Саксона, Макарова, Юкавы и др. [3–10].

Важность потенциальной модели, в первую очередь, определяется тем, насколько она хорошо описывает те или иные свойства рассматриваемой физической системы. Другая сторона модели – ее точная решаемость.

Исследование точно решаемых задач играет важную роль как в нерелятивистской, так и в релятивистской квантовой механике. Точно решаемые задачи, в частности, являются базой для развития различных приближенных методов исследования. Точное аналитическое решение волновых уравнений релятивистской и нерелятивистской квантовой механики известно лишь для очень ограниченного класса потенциальных полей $V(\vec{r})$. Нахождение точных решений волновых уравнений всегда было и остается важной актуальной задачей. Релятивистские волновые уравнения КФГ и Дирака для заряда во внешнем электромагнитном поле являются основой квантовой электродинамики [1].

Огромное значение в квантовой механике имеют аналитические решения уравнения Шредингера, Клейна – Фока – Гордона и уравнения Дирака, потому что получаемая волновая функция обеспечивает всю важную информацию для полного описания квантовых систем. Незначительное количество потенциалов может быть решено точно для уравнения КФГ с любыми радиальными и орбитальными квантовыми числами [11–20]. Известно, что квантовые системы могут быть изучены разными методами, включая такие методы, как суперсимметрия, метод факторизации, подход с

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.533

DOI: 10.17223/00213411/66/6/10

**Электродинамический механизм ускорения ионов
в начальной стадии вакуумного пробоя***В.Ю. Кожевников¹, А.В. Козырев¹, Н.С. Семенюк¹, А.О. Коковин¹¹ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Приводится теоретическое объяснение явления «аномального» ускорения ионов, происходящего в начальной стадии вакуумного пробоя в вакуумных диодах с квазинепрерывной эмиссией плазмы катодного факела. Теоретическое обоснование электродинамической природы явления дается в рамках одномерной бесстолкновительной кинетической модели неравновесной плазмы, основанной на системе уравнений Власова – Пуассона для описания динамики заряженных частиц. Численное решение нестационарных уравнений детализирует нетепловой механизм ускорения ионов от катода к аноду, который ассоциирован с самосогласованным движением минимума электрического потенциала (виртуального катода).

Ключевые слова: вакуумный пробой, кинетическое уравнение Власова, катодный факел, виртуальный катод.

Введение

На протяжении нескольких последних десятилетий проблема переноса электрического тока в плазменной среде в условиях формирования вакуумного пробоя не теряет своей актуальности. Эта область исследований вакуумного пробоя включает в себя большое количество физических эффектов и процессов, протекающих в различных пространственных и временных масштабах. Одним из них является формирование электронного пучка в вакуумном диоде с плазменным катодом, образованным взрывной плазменной эмиссией или лазерным зажиганием [1]. Данное явление имеет широкое применение при создании электрических переключателей большой мощности, в физике распыления материалов, а также при создании источников ионов и плазмы [2].

Известно, что катодная плазма, образующаяся за счет взрыва микроскопических неровностей катода, расширяется в диодный промежуток со скоростями, значительно превышающими те, что можно было бы ожидать при тепловом испарении вещества [1, 3]. Типичные средние скорости движения ионов соответствуют кинетическим энергиям в десятки и даже сотни электрон-вольт [4], в то время как характерные тепловые энергии плазменных частиц не превышают единиц электрон-вольт. Экспериментальные факты о том, что потоки ионов с энергиями свыше 100 эВ наблюдаются в вакуумных дугах и их физические параметры надежно измеряются [5], не вызывают никаких сомнений. Ввиду того, что кинетические энергии ионов (свыше 100 эВ) многократно превышают характерные значения напряжения горения дугового разряда (80 В и ниже), то такие ионы можно называть ионами с «аномально» высокими энергиями по аналогии с быстрыми электронами в вакуумных и газовых разрядах [6]. Транспортные процессы ионов с «аномально» высокими энергиями в вакуумных разрядах на различных стадиях процесса вакуумного пробоя называются «аномальным» ускорением положительно заряженных ионов из-за их способности двигаться из прикатодной области с более низким электрическим потенциалом к аноду, т.е. в область с более высоким электрическим потенциалом. Ранее в экспериментальной работе [7] было убедительно показано, что до 10–12% от общего электрического заряда через анод в дуговых разрядах приходится на «аномальный» перенос положительных ионов.

В литературе существует несколько теоретических объяснений возможной причины «аномального» механизма переноса ионов в вакуумных разрядах. Одно из объяснений заключается в том, что ионы приобретают значительные кинетические энергии и способность двигаться в сторону анода за счет формирования фазовых переходов, локализованных в областях электромагнитных и гидродинамических разрывов [8]. Другим распространенным объяснением механизма «аномаль-

* Исследование выполнено в рамках выполнения проекта Российского научного фонда (проект № 23-29-00239).

Синхронизация электромагнитных резонансов в терагерцовом черенковском генераторе*

М.П. Дейчули¹, В.И. Кошелев¹, А.А. Петкун¹, В.А. Чазов¹

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

С использованием разработанной 2.5D-гибридной программы выполнено моделирование взаимодействия пучка и поля в терагерцовом черенковском генераторе. Трубчатый электронный пучок толщиной 0.3 мм и энергией 350–515 кэВ инжектировался в сверхразмерную замедляющую структуру диаметром 40 мм с предварительно рассчитанными полями трех резонансов с частотами 367.8, 365.8, 362 ГГц и добротностями 2464, 622, 296 соответственно. Исследования показали, что для адекватного описания взаимодействия пучка и поля достаточно учитывать первые два резонанса, которые синхронизируются на частоте, зависящей от радиуса и тока пучка, энергии электронов, магнитного поля. Время до установления синхронной частоты практически не зависит от тока пучка (2–10 кА).

Ключевые слова: черенковское излучение, сверхразмерная замедляющая структура, электромагнитный резонанс, релятивистский электронный пучок.

Введение

В настоящее время широким фронтом ведутся исследования по генерации терагерцового излучения с использованием различных подходов [1–3]. Мы выделим здесь только вакуумные электронные устройства. Под терагерцовым излучением мы будем полагать излучение в диапазоне частот 0.3–3 ТГц [2]. Представляется важным разработка мобильных источников мощного (~ 100 МВт) терагерцового излучения для решения различных прикладных задач [1]. Создание таких источников излучения возможно при использовании компактных сильноточных наносекундных ускорителей типа СИНУС [4, 5] с энергией электронов примерно 500 кэВ и менее.

Для увеличения пиковой мощности излучения широко используются черенковские генераторы со сверхразмерными (диаметр D больше длины волны излучения λ) замедляющими структурами. По результатам опубликованных исследований можно наблюдать переход от одномодового (одноволнового) взаимодействия пучка и поля при $D/\lambda \leq 1$ к многоволновому при $D/\lambda \gg 1$. К многоволновым мы относим устройства, в которых электронный пучок взаимодействует на фиксированной частоте с несколькими распространяющимися однородными и неоднородными волнами электродинамической структуры [6]. В работах [7–10] при $D/\lambda \approx 2.5$ исследовано двухволновое (TM_{01} , TM_{02}) взаимодействие пучка и поля. Теоретически изучено также трехволновое (TM_{01} , TM_{02} , TM_{03}) взаимодействие пучка и поля при $D/\lambda = 3.5$ [11]. Для фиксации частоты в этих устройствах, как и в многоволновых черенковских генераторах [12], использовалось взаимодействие пучка и поля вблизи π -вида колебаний моды TM_{01} . Отметим также исследования [13] взаимодействия двух электромагнитных резонансов одно- и двухсекционных сверхразмерных ($D/\lambda = 4$) замедляющих структур с электронным пучком в бесконечном магнитном поле в X-диапазоне.

Результаты экспериментальных исследований генерации терагерцового излучения с использованием трубчатых пучков, формируемых в диодах с взрывной эмиссией электронов, приведены в работах [14, 15]. В экспериментах [14] использовались длинные (40–400 периодов прямоугольных диафрагм) однородные цилиндрические замедляющие структуры двух вариантов с диаметром 30 мм и отношением $D/\lambda = 30$ и 40. Трубчатые электронные пучки с током 300 А и энергией 30.5–82.2 кэВ транспортировались в магнитном поле 0.82 Тл. В первом варианте получено излучение на частотах 0.26–0.34 ТГц, а во втором варианте диапазон частот находился в пределах 0.31–0.39 ТГц. Излучение было широкополосным, полоса частот составляла 0.08 ТГц. Мощность излучения была киловаттного уровня.

В экспериментах [15] использовалась однородная цилиндрическая замедляющая структура с 28 прямоугольными диафрагмами диаметром 6 мм и отношением $D/\lambda = 6.8$. Электронный пучок формировался при напряжении на диоде 350–480 кВ. Ток пучка изменялся в пределах 2.3–3.6 кА.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00063.

Влияние ультрафиолетового облучения на пробой газов

Т.Н. Эфендиева¹, К.А. Эфендиев²

¹ *Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, г. Махачкала, Россия*

² *Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Россия*

В инертных и молекулярных газах в однородном электрическом поле экспериментально исследован разряд, возникающий когда напряжение на газовом промежутке меньше напряжения статического пробоя. Исследовано влияние ультрафиолетового облучения разрядного промежутка на время формирования пробоя, на напряжение пробоя и время спада напряжения, когда разрядный промежуток находится в режиме недонапряжения. Показано, что в молекулярных газах зависимость положительного заряда и длиной промежутка можно объяснить величиной пространственного положительного заряда. Представлены результаты экспериментального исследования механизма формирования искровых каналов в инертных и молекулярных газах. Показано, что отличительной особенностью формирования искрового канала в молекулярных газах является возникновение у катода ярких вспышек света. Установлены закономерности формирования искровых каналов под действием ультрафиолетового облучения.

Ключевые слова: *искровой разряд, ультрафиолетовое облучение, энергия облучения, недонапряжение газового промежутка, время формирования пробоя, напряжение пробоя, время спада напряжения, пространственный заряд, отрицательный стример, положительный стример, искровой канал, контрагирование газовых разрядов.*

Введение

Исследования пробоя газов при наличии ультрафиолетового (УФ) облучения представляют большой теоретический и практический интерес. Такие исследования позволяют уточнить механизм пробоя, расширить круг технических применений газовых разрядов. Интерес к ним повысился в связи с применением объемных разрядов для накачки газовых технологических лазеров, а также лазеров, применяемых в медицине и в научно-исследовательских работах [1–3]. Объемные разряды широко используются для создания плазмохимических реакторов. Мощность лазеров определяется энергией, которая выделяется в единице объема плазмы, и длительностью горения объемного разряда, предел которого определяет контрагирование объемного разряда.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния УФ-облучения на временные характеристики газового разряда, на напряжение пробоя и установление механизма контрагирования газовых разрядов.

Методика эксперимента

Недонапряжением газового промежутка называется величина

$$w = \frac{U_0 - U}{U_0} 100\%,$$

где U_0 – статическое пробивное напряжение; U – поданное на промежуток напряжение, которое меньше напряжения статического пробоя.

На рис. 1 приведена схематическая форма осциллограммы пробоя недонапряженного промежутка.

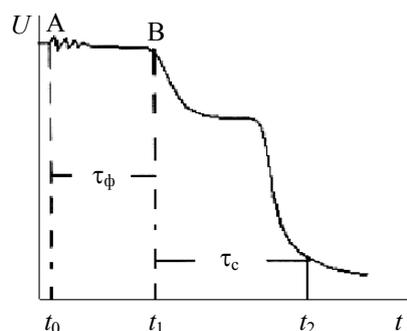


Рис. 1. К определению времени формирования пробоя

К моменту времени t_0 , соответствующему точке А (рис. 1), начинается облучение испытуемого промежутка S_0 светом искры в промежутке S_1 , что сводит статическое время запаздывания к пренебрежимо малой величине по отношению ко времени формирования пробоя. В этом случае временем формирования пробоя τ_{ϕ} будет время, проходящее от момента начала облучения t_0 (рис. 1, точка А) до момента резкого провала напряжения t_1 (точка В). Колебания напряжения на осциллограмме вызываются намоткой на одно плечо делителя напряжения нескольких витков проволоки с индуктивностью L . Электроды испытуемого промежутка S_0 имели форму электродов Роговского, т.е. электрическое поле было однородным.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.956

DOI: 10.17223/00213411/66/6/13

Исследование свойств пленок HfO_2 , выращенных методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения при разных температурах роста*Д.В. Горшков¹, Е.Р. Закиров¹, Г.Ю. Сидоров¹,
И.В. Сабина¹, А.К. Гутаковский¹, В.И. Вдовин¹¹ *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Изучены свойства тонких пленок HfO_2 , выращенных методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения с удаленной плазмой кислорода при температурах в диапазоне 80–160 °С. Для каждой температуры определено оптимальное время пост-плазменной откочки, при котором скорость роста за один цикл выходила на насыщение. Исследование химического состава методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволило установить, что увеличение времени пост-плазменной откочки приводит к уменьшению концентрации примесей, таких как азот и углерод, в пленке HfO_2 . Были измерены следующие электрофизические параметры выращенных пленок HfO_2 : емкость, диэлектрическая постоянная и плотность тока утечки. Исследования поперечных срезов диэлектрика методом ПЭМ показали наличие «зернистой» структуры в пленке HfO_2 , выращенной при температуре 80 °С.

Ключевые слова: HfO_2 , плазменно-стимулированное атомно-слоевое осаждение, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, вольт-фарадные характеристики.

Введение

Исследование диэлектрических слоев HfO_2 началось с поиска новых high-k диэлектриков для замены SiO_2 в микроэлектронике. В связи с наличием определенных структурных дефектов этот материал представляет интерес для создания энергонезависимой резистивной памяти (Resistive Random Access Memory, RRAM) [1]. Помимо этого, перспективность использования HfO_2 в роли пассивирующего диэлектрика для узкозонных полупроводниковых соединений A_3B_5 демонстрировалась в работах [2–4], а для узкозонного $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$ – в работе [5]. Твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) активно используется не только для создания лазеров и детекторов ИК-излучения [6, 7], но и относительно новых объектов, таких как топологические изоляторы [8]. Одной из технологических сложностей в пассивации КРТ является ограничение температуры нанесения пассивирующей пленки, так как при его нагреве в вакууме всего до 120 °С наблюдается обеднение приповерхностной области ртутью [9], что, в свою очередь, влияет на параметры конечного прибора. Тем не менее существует ряд работ, в которых пассивация CdHgTe осуществлялась оксидом алюминия, выращенным методом плазменно-стимулированного атомно-слоевого осаждения (ПАСО, Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition – PE-ALD) при температуре 120 °С [10–12]. Более того, в работе [13] был сделан вывод, что оптимальная температура нанесения Al_2O_3 методом ПАСО в качестве диэлектрического пассивирующего покрытия для CdHgTe лежит в диапазоне температур 120–160 °С.

В работе [14] было показано, что, используя в качестве окислителя прямую плазму (direct plasma) кислорода, возможно понизить температурное окно нанесения – диапазон температур, в котором скорость роста за один цикл (growth per cycle, GPC) меняется незначительно, до 80 °С. В работе [15] по исследованию Al_2O_3 было показано, что снижение скорости роста за один цикл и ее выход на насыщение связано со снижением и выходом на насыщение концентрации примесей в исследуемом диэлектрике и приводит к улучшению его свойств. Следовательно, этот параметр можно рассматривать как один из показателей, характеризующих качество диэлектрической пленки. В работах [14, 16] поиск времен фаз атомно-слоевого осаждения основывался на выходе ско-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-10134). Работа выполнена с применением оборудования ЦКП «Наноструктуры».

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 519.2; 53.082.4519.21; 551.596

DOI: 10.17223/00213411/66/6/14

Робастные непараметрические датчики случайных величин*

В.А. Симахин¹, Л.Г. Шаманаева^{2,3}, А.В. Маер¹¹ Курганский государственный университет, г. Курган, Россия² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Рассмотрен метод построения состоятельных и эффективных алгоритмов робастных непараметрических датчиков случайных величин для задач статистического моделирования и бутстреп-процедур. Синтезированы полупараметрические и полунепараметрические алгоритмы датчиков для неоднородных экспериментальных данных. Показано, что в условиях неоднородных выборок стандартные параметрические и непараметрические датчики случайных величин не состоятельны и их использование может существенно и непредсказуемо исказить результаты моделирования и процедур принятия решений. При наличии выбросов робастные полупараметрические и полунепараметрические датчики по эффективности могут значительно превосходить стандартные датчики случайных величин, особенно в ситуациях с асимметричными выбросами.

Ключевые слова: статистическое моделирование, полунепараметрические датчики, бутстреп, робастный датчик случайных величин.

Введение

Появление доступных высокопроизводительных средств вычислительной техники сделало возможным проводить исследования сложных систем методами Монте-Карло [1–7], в которых важнейшим элементом математической модели системы являются программы-генераторы (датчики) псевдослучайных чисел (процессов) [1]. В настоящее время имеются специализированные пакеты прикладных программ (ППП), а популярные программные среды имеют развитое программное обеспечение для статистического моделирования в виде подсистем датчиков случайных чисел (ПОД). В таких системах широко представлены параметрические датчики для случая, при котором вид распределения $F(x, \bar{\theta})$ случайной величины X известен с точностью до параметра $\bar{\theta}$. Если $\bar{\theta}$ неизвестен, то по выборке экспериментальных данных $\bar{X}_N = (x_1, \dots, x_N)$ проводят его оценку $\bar{\theta}_N$ и настройку датчика путем подстановки вместо неизвестного $\bar{\theta}$ его оценки $\bar{\theta}_N$. Потребность исследования свойств статистических процедур при конечных объемах выборки N с помощью методов Монте-Карло породила бутстреп (bootstrap), основой которого являются непараметрические датчики случайных величин [4–6].

При разработке алгоритмов датчиков на основе экспериментальных данных для нахождения несмещенных, состоятельных и эффективных оценок параметров широко применяются параметрические и непараметрические методы математической статистики. В то же время исследователям хорошо известна проблема появления в экспериментальных данных аномальных наблюдений (выбросов). Стандартные методы обработки таких неоднородных выборок могут приводить к значительным смещениям и низкой эффективности оценок параметров. Выбросы могут существенно и непредсказуемо исказить результаты процедур принятия решений [3, 7–11]. Многовековой подход, выработанный экспериментаторами, связан с «очисткой» выборки от выбросов, но для его объективного применения требуются непараметрические критерии обнаружения выбросов, при создании которых возникают существенные проблемы [8]. Появление робастной статистики пере-

* Работа выполнена в рамках госзадания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 629.7.023.222:538.958

DOI: 10.17223/00213411/66/6/15

Радиационная стойкость оптических свойств порошка диоксида циркония, модифицированного наночастицами диоксида церия*М.М. Михайлов¹, С.А. Юрьев¹, А.Н. Лапин¹, В.А. Горончко¹, Т.А. Утебеков¹¹ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

Исследовали спектры диффузного отражения до и после облучения электронами ($E = 30$ кэВ, $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻²) исходного порошка ZrO_2 и модифицированного наночастицами SeO_2 ($C = 0.1$ мас.%). Установлено, что модифицирование приводит к увеличению радиационной стойкости порошка ZrO_2 в 1.75 раза, при этом исходные значения коэффициента поглощения a_s практически не изменяются. Модифицирование наночастицами SeO_2 является эффективным способом повышения радиационной стойкости терморегулирующих покрытий космических аппаратов.

Ключевые слова: диоксид циркония, диоксид церия, порошки, наночастицы, оптические свойства, облучение.

Диоксид циркония (ZrO_2) широко используется благодаря своим химическим и физическим свойствам, таким как превосходная огнеупорность и химическая стойкость, хорошая механическая прочность, высокая ионная проводимость, низкая теплопроводность при высоких температурах и хорошая термическая стабильность. Он используется в твердотельных электролитах, термобарьерных покрытиях, электрооптических материалах [1], катализаторах [2], датчиках кислорода [3], керамических биоматериалах [4] и термолуминесцентных УФ-дозиметрах [5, 6]. За счет своих диэлектрических свойств ZrO_2 применяется в различных изоляторах, в том числе на предприятиях ядерной энергетики. Поскольку порошки диоксида циркония обладают высокой отражательной способностью, то они могут быть использованы в качестве пигмента для терморегулирующих покрытий (ТРП) космических аппаратов.

Области применения таких материалов подразумевают воздействие ионизирующего излучения, в результате чего происходит деградация оптических и других свойств. Одним из способов повышения фото- и радиационной стойкости порошков является их высокотемпературное модифицирование наночастицами.

В настоящей работе осуществляли высокотемпературное модифицирование порошков ZrO_2 наночастицами диоксида церия (SeO_2). В качестве объектов исследования были использованы порошок ZrO_2 (средний размер зерен 0.3 мкм, чистота 99.9%) и наночастицы SeO_2 (средний размер зерен 20–30 нм) производства «China Rare Metal Material Co., LTD». Модифицирование осуществляли твердотельным способом. Концентрация нанопорошка составляла 0.1 мас.%. Нанопорошок SeO_2 диспергировали в дистиллированной воде при воздействии ультразвуковых волн, затем в полученный раствор добавляли микропорошок ZrO_2 и перемешивали в течение 3 ч в магнитной мешалке. Полученную смесь высушивали при температуре 150 °С в сушильном шкафу, перетирали в агатовой ступке и прогревали 2 ч в муфельной печи в атмосфере при температуре 800 °С. Приготовленные образцы закрепляли в камере установки «Спектр» – имитатора условий космического пространства [7]. Спектры диффузного отражения (ρ_λ) регистрировали до и после облучения в вакууме $P = 5 \cdot 10^{-6}$ Торр на месте облучения (*in situ*), поскольку при контакте с кислородом атмосферы после облучения происходит «отбеливание» – уменьшение концентрации образованных центров окраски оксидных отражающих порошков. Облучение осуществляли электронами с энергией 30 кэВ флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻². Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s), который является рабочей характеристикой ТРП, рассчитывали по спектрам ρ_λ с использованием международных стандартов [8, 9].

На рис. 1 представлены спектры ρ_λ исходных и модифицированных порошков ZrO_2 до и после облучения электронами.

Исходный порошок ZrO_2 обладает высокой отражательной способностью (> 90%) в широком диапазоне спектра от 375 до 2200 нм. Регистрируемый край поглощения на длине волны 232 нм соответствует значению ширины запрещенной зоны 5.34 эВ. Такое значение согласуется с известными данными по диоксиду циркония [10]. Облучение приводит к снижению отражательной способности в области от 250 до 950 нм. В более длинноволновой области изменений нет или они незначительны.

Высокотемпературное модифицирование порошка ZrO_2 наночастицами SeO_2 при концентрации 0.1 мас.% приводит к уменьшению его отражательной способности в коротковолновой области спектра от 250 до 435 нм (проявлению края поглощения SeO_2) и увеличению в области от 435 до 2500 нм. Отражатель-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 21-72-10032, <https://rscf.ru/project/21-72-10032/>.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2023. Т. 66. № 6

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

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

Подписано к печати 20.06.2023. Выпуск в свет 22.06.2023. Заказ № 5497.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 15.81. Уч.-изд. л. 17.71. 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

