

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

3·2024

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 67

Март, 2024

№ 3 (796)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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



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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

- Стариков В.И., Михайленко С.Н. Анализ коэффициентов уширения линий молекул H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O и D_2^{18}O давлением воздуха и азота 5
- Белибихин С.В., Конобеева Н.Н. Влияние полимера на распространение предельно коротких оптических импульсов в углеродных нанотрубках с учетом многофотонного поглощения 14

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Степанов Н.П., Иванов М.С., Степанова Л.Э. Закономерности поведения температурных зависимостей коэффициента Холла и удельной электропроводности кристаллов твердых растворов $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$ ($0 < x < 2$) в интервале 78–297 К 20

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Демин В.А., Петухов М.И. Об аналитическом решении уравнений переноса при описании ионного пограничного слоя в задаче протонного обмена 28
- Гладков С.О., Нагибин Н.С. К вопросу аналитического определения наилучшей формы обтекания тел в вязком континууме 39
- Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Рейно В.В., Хасанов И.Р., Колесников И.А., Лобода Ю.А., Базаров Д.Д. Комбинированный подход в тушении очага горения растительных горючих материалов 53

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Абдуллаев С.К., Годжаев М.Ш. Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. II 61
- Овсенёв А.Е., Смольников Н.В., Гладких М.В., Аникин М.Н., Лебедев И.И., Наймушин А.Г., Каныгин В.В., Каныгин Н.В., Кичигин А.И., Пахомова Е.Е. Расчетно-экспериментальное измерение плотности потока нейтронов и мощности дозы γ -излучения на реакторе ИРТ-Т для проведения нейтрон-захватной терапии 74
- Гордиенко А.Б., Коробко К.В. Вычисление сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна 82

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Ахметшин Л.Р., Иохим К.В., Казанцева Е.А., Смолин И.Ю. Эффективные механические свойства двухмерного тетрахирального метаматериала 90
- Грабко Г.И. Сравнительный анализ поляризационных процессов в композитных составах на основе поликристаллического ортоплюмбата свинца 100
- Барышников С.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В. Нелинейные диэлектрические свойства нитрата рубидия и нанокompозитов на его основе 107
- Тагиев М.М., Абдуллаева И.А. Влияние γ -радиации на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированных акцепторной примесью свинца 115

CONTENTS

OPTICS AND SPECTROSCOPY

- Starikov V.I., Mikhailenko S.N.** Analysis of broadening coefficients of $H_2^{17}O$, $H_2^{18}O$, $HD^{16}O$, $HD^{18}O$, $D_2^{16}O$, and $D_2^{18}O$ absorption lines by air and nitrogen pressure..... 5
- Belibikhin S.V., Konobeeva N.N.** Influence of polymer on the propagation of extremely short optical pulses in carbon nanotubes taken into account multi-photon absorption 14

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

- Stepanov N.P., Ivanov M.S., Stepanova L.E.** Regularities of the behavior of temperature dependences of the Hall coefficient and specific electrical conductivity of $(Bi_{2-x}Sb_x)Te_3$ ($0 < x < 2$) solid solution crystals in the range of 78–297 K..... 20

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

- Demin V.A., Petukhov M.I.** Analytical solution of the transfer equations in the description of ionic boundary layer in the proton exchange problem..... 28
- Gladkov S.O., Nagibin N.S.** Analytical determination of the best form of flow around bodies in a viscous continuum..... 39
- Loboda E.L., Agafontsev M.V., Staroseltseva A.A., Reyno V.V., Khasanov I.R., Kolesnikov I.A., Loboda Y.A., Bazarov D.D.** A combined approach to extinguishing the source of combustion of vegetative combustible materials 53

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

- Abdullayev S.K., Gojayev M.Sh.** Production of the Higgs boson and γ -quantum in muon-antimuon collisions (II)..... 61
- Ovsenev A.E., Smolnikov N.V., Gladkikh M.V., Anikin M.N., Lebedev I.I., Naymushin A.G., Kanygin V.V., Kanygin N.V., Kichigin A.I., Pakhomova E.E.** Computational and experimental determination of neutron flux density and gamma radiation dose rate at the IRT-T reactor for neutron capture therapy 74
- Gordienko A.B., Korobko K.V.** Calculation of singular integrals over Brillouin zone 82

CONDENSED-STATE PHYSICS

- Akhmetshin L.R., Iokhim K.V., Kazantseva E.A., Smolin I.Yu.** Effective mechanical properties of a two-dimensional tetrachiral metamaterial..... 90
- Grabko G.I.** Comparative analysis of polarization processes in composite compounds based on polycrystalline lead orthoplumbate 100
- Baryshnikov S.V., Milinskiy A.Yu., Stukova E.V.** Nonlinear dielectric properties of rubidium nitrate and nanocomposites based on it 107
- Tagiyev M.M., Abdullayeva I.A.** Influence of γ -radiation on the thermoelectric properties of extruded samples of $Bi_{0.85}Sb_{0.15}$ solid solution doped with lead acceptor impurity..... 115

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 539.534.539.194

DOI: 10.17223/00213411/67/3/1

Анализ коэффициентов уширения линий молекул H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O и D_2^{18}O давлением воздуха и азотаВ.И. Стариков¹, С.Н. Михайленко²¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Проведен анализ известных к настоящему времени экспериментальных данных по коэффициентам уширения γ линий поглощения молекул H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O и D_2^{18}O давлением воздуха и азота. Для расчетов γ предложено использовать аналитическую модель $\gamma(\text{sur})$, зависящую от подгоночных параметров. Проведено сравнение рассчитанных по модели $\gamma(\text{sur})$ коэффициентов γ с экспериментальными данными и данными из базы спектроскопической информации HITRAN (The HITRAN Database, <https://hitran.org>). В ряде случаев обнаружены значительные отличия в значениях γ , рассчитанных по модели $\gamma(\text{sur})$, от значений γ из базы данных HITRAN.

Ключевые слова: уширение, молекулы H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O , D_2^{18}O , воздух, азот.

Введение

Молекула воды является важным объектом в спектроскопических исследованиях из-за той роли, которую водяной пар играет в поглощении солнечного излучения в земной атмосфере. В настоящее время опубликовано более ста работ, в которых приведены экспериментальные значения коэффициентов уширения γ для линий поглощения молекулы воды в диапазоне от 0.7 до 26000 см^{-1} . Большинство из этих данных занесено в базы спектроскопической информации, наиболее известной из которых является база данных HITRAN [1].

Содержание изотопических модификаций молекулы воды (по отношению к основной модификации H_2^{16}O) меняется от 0.2% для H_2^{18}O до $4.8 \cdot 10^{-9}\%$ для D_2^{18}O [1]. Тем не менее изучение параметров линий поглощения этих молекул важно как для правильной интерпретации спектров водяного пара, так и для понимания изотопических эффектов в этой молекуле.

Цель работы – анализ опубликованных к настоящему времени экспериментальных, а также занесенных в текущую версию базы HITRAN [2] данных по коэффициентам уширения γ колебательно-вращательных (КВ) линий поглощения молекул H_2^{17}O , H_2^{18}O , HD^{16}O , HD^{18}O , D_2^{16}O , D_2^{18}O , в случае их уширения давлением воздуха и азота, и представление этих коэффициентов в виде аналитической формулы, позволяющей проводить расчеты γ для различных КВ-переходов рассматриваемых молекул.

Критерии анализа данных

Анализ данных предполагает сравнение экспериментальных данных, полученных в различных экспериментальных группах и различными методами, выделение несовместных данных, выявление ошибочных значений γ . Это должно быть сделано с помощью определенных количественных критериев, которые тесно связаны с вопросом о погрешности экспериментальных измерений. Этот вопрос неоднократно обсуждался в литературе (см., например, [3]), и выводы сводятся к следующему. Несмотря на то, что во многих экспериментальных работах объявленная погрешность определения коэффициентов γ для линий молекулы воды в случае их уширения воздухом, азотом и кислородом составляет несколько процентов, реальная погрешность определения γ находится в пределах 10–15%. Эта оценка получена путем прямого сравнения значений γ , полученных

* Активность С.Н. Михайленко поддержана финансированием в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Влияние полимера на распространение предельно коротких оптических импульсов в углеродных нанотрубках с учетом многофотонного поглощения*

С.В. Белибихин¹, Н.Н. Конобеева¹

¹ Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Россия

Продemonстрировано влияние многофотонного поглощения на электромагнитные волны, проходящие через композитный материал, в основе которого лежит углеродсодержащая полимерная матрица со стабилизированными в ней нанотрубками. Была создана модель, учитывающая тип этого поглощения. Выявлено, что разная концентрация полимера приводит к существенным изменениям амплитуды импульса. При этом наличие полимера в среде слабо влияет на ширину предельно короткого импульса, сохраняется область его локализации. Это позволяет использовать полимерные композиты с углеродными нанотрубками в приложениях нелинейной оптики.

Ключевые слова: полимеры, углеродные нанотрубки, электромагнитные волны, многофотонное поглощение.

Введение

Многофотонное поглощение – это квантово-механический процесс, при котором атом поглощает несколько фотонов одновременно и, следовательно, может преодолеть энергетический барьер, который превышает энергию одного фотона в случае одиночного возбуждения [1]. Многофотонное поглощение было предсказано около ста лет назад Марией Гепперт-Мейер. За три десятилетия до экспериментального наблюдения этого процесса в ее работе была описана теоретическая модель, объединяющая принципы многофотонного взаимодействия света и вещества. Показано, что атом может поглощать два или более фотонов, что позволяет электрону переходить в состояния, которые не могут быть получены при поглощении одного фотона. Фактически многофотонное поглощение было одним из первых эффектов, продемонстрированных с помощью лазеров, поскольку можно было достичь интенсивности, намного превышающей ту, которую обеспечивают другие источники света.

Как известно, процесс многофотонного поглощения имеет множество практических применений, включая накачку лазерных сред и мониторинг параметров лазерного излучения [2], выращивание широкозонных полупроводниковых пленок с помощью фемтосекундных лазеров [3], прогнозирование радиационных эффектов в микроэлектронике [4] и многое другое. Поэтому очень важно учитывать эти процессы при изучении эволюционных характеристик электромагнитных импульсов при распространении в различных нелинейных средах, в том числе содержащих углеродные наноструктуры. Так, например, углеродные нанотрубки (УНТ) [5], наряду с такими свойствами, как прочность, упругость, адгезия к различным подложкам и др., обладают способностью оказывать стабилизирующее действие на предельно короткие оптические импульсы [6]. При этом получить массив нанотрубок с определенной пространственной структурой достаточно сложно.

В данной работе мы будем исследовать динамику электромагнитных импульсов в композитном материале, состоящем из полимера и УНТ [7], поскольку это наиболее удобный вариант, применяемый для различных практических целей. С одной стороны, добавление УНТ в полимер способствует улучшению многих свойств последнего [8]. А с другой стороны, полимер позволяет добиться определенного расположения и плотности углеродных нанотрубок. Для осуществления поставленной цели мы будем использовать разработанную модель [9], что позволит провести ее обобщение на случай полимерных матриц. Ранее проводились исследования динамики предельно коротких импульсов в среде с углеродными нанотрубками без учета полимера, введение которого позволит создать необходимую упаковку для трубок с заданными параметрами. При этом важно оценить степень влияния полимера на пространственно-энергетические характеристики импульса, что и обуславливает актуальность настоящей работы.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «FZUU–2023–0001»).

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.935; 538.955

DOI: 10.17223/00213411/67/3/3

Закономерности поведения температурных зависимостей коэффициента Холла и удельной электропроводности кристаллов твердых растворов $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$ ($0 < x < 2$) в интервале 78–297 К*Н.П. Степанов¹, М.С. Иванов², Л.Э. Степанова¹¹ Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия² Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Россия

Температурные зависимости коэффициента Холла и удельной электропроводности кристаллов твердых растворов $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$ ($0 < x < 2$) p -типа получены в интервале температур от 78 до 297 К. Показано, что во всех исследованных кристаллах наблюдается увеличение коэффициента Холла с ростом температуры, сопровождающееся уменьшением электропроводности и подвижности свободных носителей заряда. Анализируются причины изменения вида температурной зависимости коэффициента Холла, наблюдающегося в легированных кристаллах $(\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$.

Ключевые слова: теллуриды висмута и сурьмы, коэффициент Холла, электропроводность, электрон-плазменные взаимодействия.

Введение

Теллуриды висмута и сурьмы продолжают интенсивно исследоваться. При этом изучаются объемные свойства, влияющие на их термоэлектрическую эффективность [1–3], изготовленные из них пленки [4–7] и наноматериалы [8, 9]. Представляют интерес их свойства и как топологических изоляторов [10–12]. Все это предопределяет значимость их всестороннего исследования, в том числе и механизмов влияния на состояние электронной системы. Особенностью кристаллов Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 является то, что в них оказываются сопоставимы энергии элементарных возбуждений в электронном, фононном и плазмоне спектрах. Это предопределяет возможность существования сложно структурированных состояний электронной и ионной подсистем, возникающих вследствие взаимодействий перечисленных возбуждений, способных влиять на их свойства. Например, в монокристалле $\text{Bi}_{0.6}\text{Sb}_{1.4}\text{Te}_3$ p -типа проводимости обнаружены особенности в поведении температурной зависимости магнитной восприимчивости [13]. Они наблюдаются в диапазоне температур сближения энергии плазмона E_p и энергии зазора, отделяющего уровень химического потенциала от подзоны тяжелых дырок ΔE , и, наиболее вероятно, обусловлены электрон-плазмонным взаимодействием. В этом же диапазоне температур в Bi_2Te_3 p -типа наблюдается аномальное поведение коэффициента Холла R_H [14, 15]. Оно имеет место и в кристаллах Sb_2Te_3 , в температурном интервале от 100 до 600 К [16]. Аномальное поведение R_H наблюдается также и в кристалле $\text{Bi}_{1.9}\text{Sb}_{0.1}\text{Te}_3$, что отражено на рис. 1, из которого видно, как $R_H(T)$ изменяется в зависимости от наличия и количества легирующей примеси олова [17]. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что внесение примеси олова приводит к уменьшению концентрации легких дырок при низких температурах и существенно изменяет вид температурной зависимости коэффициента Холла. Являясь элементом четвертой группы, олово должно было создавать акцепторное действие в кристаллах Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 , увеличивая концентрацию легких дырок. Однако, как видно из рис. 1, при низких температурах наблюдается обратное: внесение олова вызывает уменьшение их концентрации. Обычно аномальная температурная зависимость коэффициента Холла в кристаллах Bi_2Te_3 – Sb_2Te_3 объясняется сложным строением валентной зоны и термическими переходами электронов из подзоны тяжелых дырок в подзону легких, в результате чего концентрация последних уменьшается. В этом случае смещение уровня химического потенциала в направлении потолка ва-

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

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 537.9

DOI: 10.17223/00213411/67/3/4

**Об аналитическом решении уравнений переноса
при описании ионного пограничного слоя в задаче протонного обмена***В.А. Демин¹, М.И. Петухов¹¹ *Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия*

Представлены результаты аналитического решения уравнений, описывающих диффузионный перенос и рекомбинацию положительно заряженных ионов лития и отрицательно заряженных бензоат-ионов в бензойной кислоте в ходе протонирования подложки ниобата лития. Бензоат-ионы и протоны образуются вследствие термической диссоциации молекул бензойной кислоты на подложке. Последние проникают в кристалл и замещают собой ионы лития, которые инжектируются в кислоту. Решение одномерной стационарной задачи дает профили концентраций, описывающие распределения ионов в канале маски.

Ключевые слова: диффузия, рекомбинация, протонный обмен.

Введение

Реакция протонного обмена часто применяется в технологии создания канальных или планарных волноводов на основе монокристаллов танталата или ниобата лития [1]. Для ее реализации поверхность кристалла приводят в контакт с расплавом кислоты, разогретым до температуры ~ 500 К. Обычно в технологическом процессе применяются слабые неорганические и органические кислоты, имеющие низкую кислотность и токсичность [2]. Примерами могут быть бензойная [3], пирофосфорная [4], пальмитиновая кислота [5] и др. В таких условиях появляется возможность интенсивной термической диссоциации молекул кислоты при контакте с поверхностью кристалла. Так, в случае использования бензойной кислоты в результате диссоциации появляются положительно заряженные ионы водорода и отрицательно заряженные бензоат-ионы. Освободившимся протонам, которые находятся в непосредственной близости от подложки, наиболее выгодно проникнуть в глубь кристалла с последующим замещением ионов лития согласно следующей реакции:



В ответ на данную реакцию ионы лития, содержащиеся в кристалле, переходят в бензойную кислоту, где впоследствии рекомбинируют с бензоат-ионами.

При изготовлении канальных волноводов кристалл подвергается предварительной обработке в виде нанесения на его поверхность фотолитографической маски таким образом, чтобы непосредственному контакту с кислотой подвергался только узкий участок поверхности. В этой области происходит протонирование кристалла.

Диффузии протонов внутрь подложки посвящено большое количество экспериментальных работ. Многочисленные исследования показывают, что глубина протонированной области составляет ~ 1 мкм при продолжительности процесса ~ 1–2 ч. Профили концентрации водорода в кристалле и, как следствие, профили изменения его показателя преломления имеют характерную ступенчатую форму.

Для создания протонообменных волноводов используются разные модификации технологии [1]. Так, в некоторых случаях, после непосредственного проведения протонного обмена, подложка подвергается отжигу для увеличения толщины волновода и уменьшения оптических потерь [6]. Другой метод заключается в протонировании подложки кислотой, разбавленной дополнительными примесями [7], что зачастую увеличивает качество конечного волновода.

Рассматриваемая реакция замещения сопровождается возникновением множества кристаллических фаз, количество и расположение которых определяются кристаллом и параметрами протонного обмена [8–10].

* Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 121101300016-2.

К вопросу аналитического определения наилучшей формы обтекания тел в вязком континууме

С.О. Гладков¹, Н.С. Нагибин¹

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия*

С помощью уравнения Прандтля и благодаря методам вариационного исчисления получены уравнения, позволяющие аналитически определить вид контура, для которого сила сопротивления при обтекании вязким потоком становится наименьшей. Аналитически строго доказано, что продольное сечение разреза хорошо обтекаемых тел может иметь различный вид в зависимости от числа Рейнольдса. Найденные уравнения проанализированы численно и проиллюстрированы графически.

Ключевые слова: уравнение Прандтля, уравнение непрерывности, уравнение Навье – Стокса, нелинейное уравнение, граничные условия.

Введение

Задача, о которой сейчас пойдет речь, относится к общим проблемам теоретической гидро- и аэродинамики.

Хорошо известно (см. литературу [1–11]), что если рассмотреть разрез дождевой капли, то благодаря практически отсутствующей турбулентности в области ее хвостовой части испытываемое ею сопротивление становится наименьшим. Однако аналитически форму капли никто не описывал.

То же самое относится и к постановке вопроса о том, какова должна быть форма тел для осуществления, например, эффективного плавания. При этом невольно вспоминается тот факт, что в подавляющем большинстве примеров физическая скорость движения, как правило, не велика, а число Рейнольдса, R , в непосредственной близости к поверхности тела мало, и важную роль должно играть межмолекулярное взаимодействие.

С учетом вязкости и в стоксовом приближении всегда будет иметь место условие «залипания» потока (см. [1], а также работы [12–21]). С физической точки зрения суть сказанного можно пояснить следующим образом. Если в рамках решаемой задачи необходимо принять во внимание вязкость континуума, то этот факт автоматически означает учет взаимодействия между контактирующими слоями жидкости. А следовательно, необходимо учесть и взаимодействие молекул жидкости с поверхностью. Таким образом, пренебрегая вязкостью, мы тем самым пренебрегаем и взаимодействием потока с поверхностью тела. В этом случае у нас появляется пограничный слой шириной $\delta = \frac{L}{\sqrt{R}}$, где L – линейный размер тела (см. [1]), и будет иметь место потенциальное об-

текание, как это подробно описано в [1]. Граничное условие в этом случае задается в виде равенства нулю только нормальной компоненты скорости на поверхности. При учете же межмолекулярного взаимодействия, когда важна вязкость (т.е. в приближении Стокса), должна обратиться в нуль также и касательная к поверхности тела проекция скорости, что физически и характеризует собой эффект «залипания».

Когда речь идет о сечении тела, которое мы рассматриваем, то для него так же, как и в трехмерном случае, вне пограничного слоя даже при ламинарном течении число Рейнольдса $R = \frac{u\bar{a}}{\nu}$, где u – скорость потока, $\bar{a} = \sqrt{ab}$ – средний геометрический линейный размер сечения, a – характерный размер тела вдоль оси x , b – вдоль оси z , ν – кинематическая вязкость, может быть велико.

Чтобы решить поставленную задачу, нам необходимо проанализировать уравнение Навье – Стокса и уравнение непрерывности в двухмерном базисе, предполагая тело практически плоским, но конечного размера с некоторой малой толщиной h . При этом жидкость будем считать несжи-

Комбинированный подход в тушении очага горения растительных горючих материалов

Е.Л. Лобода^{1,2}, М.В. Агафонцев^{1,2}, А.А. Старосельцева¹, В.В. Рейно²,
И.Р. Хасанов³, И.А. Колесников¹, Ю.А. Лобода^{1,2}, Д.Д. Базаров¹

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

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

³ ВНИИ противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха, Россия

Приведены описание экспериментальной установки и результаты экспериментальных исследований комбинированного тушения модельного очага горения растительных горючих материалов (РГМ) с применением ударных волн и последующим охлаждением РГМ водой. Показана эффективность комбинированного тушения очага горения по сравнению с тушением распыленной водой. Установлено, что в качестве критерия гарантированного тушения очага горения следует считать снижение температуры поверхности РГМ ниже 503 К.

Ключевые слова: природный пожар, ударные волны, детонация, пиролиз, ИК-термография.

Введение

Тушение пожаров при помощи воды или водяных растворов огнегасящих составов исследуется разными научными группами. Следует отметить, что в этой области существует несколько доминирующих направлений: разработка тактики сброса воды с помощью авиации [1, 2], тушение распыленными растворами огнегасящих веществ [3, 4] и повышение эффективности тушения водой за счет распыления капель воды над очагом горения [5].

Очевидно, что ни традиционное тушение пожаров водой, ни тушение за счет воздействия ударных волн (УВ) не дают желаемой эффективности. Большим преимуществом применения ударных волн для тушения пожара является то, что в результате детонации продуктов пиролиза [6] происходит прерывание процесса горения, а также ударная волна обеспечивает срыв проводников горения [7], обеспечивая невозможность или затрудняя распространение верхового лесного пожара. В то же время в зоне горения остается достаточно большое количество растительных горючих материалов (РГМ), имеющих температуру, при которой происходит пиролиз и образование новых порций летучих. В случае отсутствия интенсивного притока кислорода за счет ветра и повторного воспламенения продуктов пиролиза будет происходить постепенное понижение температуры растительных горючих материалов ниже температуры вспышки, что означает невозможность возобновления пламенного горения. Тем не менее при наличии ветра или интенсивного поступления тепла от соседнего очага пожара возможно появление пламени и возобновление горения. Следует отметить, что в результате срыва проводников горения на поверхности земли образуется запас РГМ, достаточный для возобновления горения и формирования устойчивого низового пожара, который в дальнейшем может привести и к возобновлению верхового пожара. Поэтому рассматривать эффект воздействия УВ на очаг горения как способ гарантированного тушения нельзя.

В случае тушения очага горения водой обеспечивается достаточное охлаждение растительных горючих материалов, участвующих в горении, но в случае крупных пожаров мощные конвективные потоки над очагом горения приводят к частичному испарению воды еще в воздухе и дроблению потока воды до формирования мелких капель [5], что в конечном счете чрезвычайно снижает эффективность тушения. В этой связи представляет интерес применение комбинированного воздействия на очаг горения, когда пламенное горение прерывается за счет воздействия ударной волны, а затем водой проводится охлаждение элементов РГМ.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований комбинированного тушения очага горения РГМ и сравнение с тушением водой без воздействия УВ.

Описание экспериментальной установки

Для проведения исследований была собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 1. В качестве РГМ 1 для проведения экспериментов была выбрана хвоя сосны, которая размещалась в кювете 2 с адиабатическими стенками, препятствующими в том числе выдуву элемен-

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 539.12-17

DOI: 10.17223/00213411/67/3/7

Рождение хиггс-бозона и γ -кванта в мюон-антимюонных столкновениях. Ч. IIС.К. Абдуллаев¹, М.Ш. Годжаев¹¹ Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

В рамках Стандартной модели исследован процесс совместного рождения хиггс-бозона и γ -кванта при мюон-антимюонной аннигиляции: $\mu^-\mu^+ \rightarrow H\gamma$. С учетом продольных поляризаций мюон-антимюонной пары и циркулярной (линейной) поляризации γ -кванта получены выражения для дифференциального и интегрального сечений процесса, соответствующего фермионным и W -бозонным петлевым диаграммам. Найдено выражение для степени циркулярной (линейной) поляризации γ -кванта и детально изучена зависимость этих характеристик, а также эффективного сечения реакции $\mu^-\mu^+ \rightarrow H\gamma$ от угла вылета фотона θ_γ и энергии $\sqrt{s}$ мюон-антимюонной пары.

Ключевые слова: хиггс-бозон, γ -квант, мюон-антимюонная пара, степень циркулярной поляризации, степень линейной поляризации.

Введение

Открытие хиггс-бозона H Стандартной модели (СМ) осуществлено коллаборациями ATLAS и CMS в Большом адронном коллайдере (БАК) в 2012 г. [1, 2] (см. обзоры [3–5]).

Хиггс-бозон – нестабильная частица, и она может распадаться по различным каналам. На БАК ее открыли, изучая распады на два фотона $H \rightarrow \gamma\gamma$ и на две пары лептон – антилептон $H \rightarrow 4\ell$, где $\ell = e^\pm$ или $\mu^\pm$. Процессы $H \rightarrow 4\ell$ происходят в два этапа: сперва хиггс-бозон распадается на два Z -бозона, один из которых виртуальный $H \rightarrow ZZ^*$, а затем каждый из Z -бозонов распадается на пару $\mu^-\mu^+$ или e^-e^+ . Это записывают как $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$. В БАК были обнаружены и следующие распады $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell\nu\ell\nu$, где W – заряженный бозон, ν – мюонное или электронное нейтрино. По данным коллаборации ATLAS найдено, что масса хиггс-бозона составляет $M_H = (126.0 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.4(\text{сист.}))$ ГэВ, а по данным коллаборации CMS – $M_H = (125.3 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 0.5(\text{сист.}))$ ГэВ.

В дальнейших экспериментах, проводимых в БАК, установлено, что хиггс-бозон H – это частица со спином нуль, положительной четностью и вакуумным средним, отличным от нуля, которая взаимодействует с W - и Z -бозонами, лептонами и кварками с константой, пропорциональной их массам. Все же исследование физических свойств хиггс-бозона СМ продолжается. Задачи ближайшего времени состоят в прецизионном измерении его основных характеристик: массы, ширины распада, константы взаимодействия с фундаментальными частицами. Новые эксперименты на БАК при полной энергии протон-протонных пучков 14 ТэВ помогут в измерении его характеристик с точностью, на порядок выше достигнутой. Возможно, для решения этих задач потребуется строительство нового поколения электрон-позитронного или мюон-антимюонного коллайдеров высокой энергии [6–11]. Электрон-позитронные и мюон-антимюонные коллайдеры высоких энергий либо уже спроектированы, либо же намечено их проектировать в различных лабораториях мира (ILC, CLIC, FCC-ee, MC).

Наиболее важные хиггс-бозонные константы взаимодействия связаны с вершинами $H\gamma\gamma$ и $HZ\gamma$. Для измерения этих констант взаимодействия особый интерес представляет исследование процесса совместного рождения хиггс-бозона и γ -кванта при столкновении электрон-позитронной (мюон-антимюонной) пары. В рамках СМ реакция $e^-e^+ \rightarrow H\gamma$ исследована в работе [12]. В этой работе авторы не интересовались поляризационными состояниями электрон-позитронной пары и фотона. Процессы $e^-e^+ \rightarrow H\gamma$, $e^-e^+ \rightarrow H^0(h; A)\gamma$ с учетом продольных поляризаций электрон-

Расчетно-экспериментальное измерение плотности потока нейтронов и мощности дозы γ -излучения на реакторе ИРТ-Т для проведения нейтрон-захватной терапии*

А.Е. Овсенёв¹, Н.В. Смольников¹, М.В. Гладких¹,
М.Н. Аникин¹, И.И. Лебедев¹, А.Г. Наймушин¹, В.В. Каныгин²,
Н.В. Каныгин², А.И. Кичигин³, Е.Е. Пахомова⁴

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

² *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

³ *Neuboron Therapy System Ltd., Xiamen Biomedical Industrial Park, Xiamen, China*

⁴ *Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), г. Москва, Россия*

Приведены результаты расчетно-экспериментального определения плотности потока тепловых нейтронов и мощности дозы γ -излучения в тканеэквивалентном фантоме, расположенном на выходе ГЭК-1 ядерного реактора ИРТ-Т. Экспериментальные значения плотности потока тепловых нейтронов в тканеэквивалентном фантоме получены с использованием активационных детекторов. Медицинским дозиметром VA-J-18 получены значения мощности дозы γ -излучения в тканеэквивалентном фантоме в различных точках от среза ГЭК-1. В программном комплексе RHITS разработана модель распределения ионизирующего излучения в ГЭК-1.

Ключевые слова: бор-нейтронозахватная терапия, ядерный реактор ИРТ-Т, программное средство RHITS, плотность потока тепловых нейтронов, мощность дозы γ -излучения.

Введение

В настоящее время онкологические заболевания занимают одно из лидирующих мест среди причин преждевременной смерти людей. Так, например, в 2021 г. онкологические заболевания стали причиной каждой шестой смерти в России [1]. Поэтому разработка и внедрение новых перспективных технологий лечения злокачественных новообразований до сих пор продолжается.

Одним из перспективных методов лечения онкологических заболеваний является нейтронозахватная терапия (НЗТ) [2]. НЗТ – это бинарная форма радиотерапии, при которой нерадиоактивный сильнопоглощающий изотоп (бор-10 или гадолиний-157) с использованием специальных транспортирующих веществ доставляется в клетки опухоли, которые подвергаются облучению потоком нейтронов. В результате взаимодействия тепловых нейтронов с изотопом бора-10 происходит мгновенная ядерная реакция $B^{10}(n, \alpha)Li^7$ с выделением энергии 2.79 МэВ. Ядро лития вылетает в возбужденном состоянии с энергией 0.84 МэВ и испускает γ -квант с энергией 0.48 МэВ. На α -частицу приходится энергия 1.47 МэВ и благодаря высоким показателям линейной передачи энергии (ЛПЭ) и вследствие этого высокой относительной биологической эффективности происходит разрушение опухолевой клетки. Гадолиний-157 имеет большее значение сечения захвата тепловых нейтронов, чем бор-10, однако вторичное излучение, испускаемое в результате захвата тепловых нейтронов, обладает меньшими значениями ЛПЭ, так как представляет собой высокоэнергетическое γ -излучение с энергией 0.15–7 МэВ.

В качестве источника нейтронов для реализации НЗТ используются как ускорители различного типа, так и исследовательские ядерные реакторы, проведенные эксперименты на которых имеют положительные клинические результаты [3]. Различные медико-биологические исследования и клинические испытания были проведены на исследовательских ядерных реакторах в Аргентине (RA-6) [4], Голландии (HFR) [5], США (BMRR, MTR, MIT-FCB) [6], Тайване (THOR) [7], Финляндии (FiR-1) [8], Чехии (LVR-15) [9], Швеции (R2-0) [10] и Японии (MuTR, KUR и JRR-4) [11].

* Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ № 23-25-00364, <https://rscf.ru/project/23-25-00364/>.

Вычисление сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна

А.Б. Гордиенко¹, К.В. Коробко¹

¹ Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Предложен метод вычисления сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна, которые являются вспомогательными при расчете обменной энергии кристаллов. Подход основан на разделении подынтегральной функции с помощью дополнительной весовой функции и дальнейшем использовании двух типов сеток численного интегрирования. Рассмотрены детали построения весовой функции, сеток интегрирования и на примерах, включающих вычисления для трех типов кубических решеток, показано, что подход обладает высокой точностью и скоростью сходимости по числу точек сетки.

Ключевые слова: зона Бриллюэна, обменная энергия, сингулярные интегралы.

Введение

В настоящее время в расчетах электронной структуры с использованием теории функционала плотности [1, 2] (ТФП) очень популярными для аппроксимации обменно-корреляционной энергии являются гибридные функционалы, такие как B3LYP [3–6], PBE0 [7, 8], HSE [9, 10], а также ряд других [11, 12], которые включают часть обменной энергии в форме Хартри – Фока (ХФ). Среди многих преимуществ гибридных форм следует отметить, прежде всего, полное исключение или значительное уменьшение влияния эффекта самодействия, что в комбинации с современными формами обменных и корреляционных ТФП-функционалов позволяет существенно повысить точность количественных оценок для энергий атомизации, вертикальных переходов, барьеров химических реакций, ряда термодинамических параметров и параметров отклика, значений ширины запрещенной зоны, энергетического положения зон локализованных состояний в соединениях с переходными элементами и т.д. Более сложная форма гибридных функционалов увеличивает как общие вычислительные затраты, так и требования к точности, что в особенности характерно для расчетов периодических систем, когда основным базисом являются плоские волны. В этом случае выражения для обменной энергии и потенциала принимают форму интеграла по обратному пространству, подынтегральная функция которого имеет существенную особенность. Несмотря на то, что указанная особенность является интегрируемой, применение стандартных методов интегрирования, таких как метод специальных точек [13, 14], будет неэффективным из-за очень медленной сходимости результатов в зависимости от числа узлов. Простой способ решения этой проблемы состоит в том, чтобы исключить сингулярность выражения для обменной энергии с помощью добавления и вычитания вспомогательной функции, имеющей аналогичную особенность, но простое аналитическое представление [15], что позволяет выразить обменную энергию и потенциал в виде регулярного выражения с аддитивной поправкой. Для кубических кристаллов эта поправка может быть вычислена аналитически [15, 16], а в остальных случаях требуется высокоточное численное интегрирование, детали которого практически не обсуждаются. Исключением, пожалуй, является единственная работа [17], где расчет указанной поправки выполнялся на регулярных сетках в зоне Бриллюэна, которые сгущаются в последовательных слоях, окружающих сингулярность, с использованием предложенной также в [17] вспомогательной функции для произвольного типа решетки.

Цель настоящей работы – разработка метода вычисления отмеченной выше поправки, который наиболее естественно учитывает характер сингулярности в выражении для обменной энергии и потенциала, а также и оценка его вычислительной эффективности точности.

1. Вычисление обменной энергии кристалла

Рассмотрим вычисление обменной энергии кристалла, считая, для удобства, что N_v зон заполнены и в каждом состоянии находится два электрона. Тогда обменная энергия на одну элементарную ячейку может быть вычислена как

$$E_x = -\frac{1}{N} \sum_{nk} \sum_{mq} \int_{(\Omega)} \frac{\psi_{nk}^*(\mathbf{r}) \psi_{mq}^*(\mathbf{r}) \psi_{mq}(\mathbf{r}') \psi_{nk}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{r} d\mathbf{r}', \quad (1)$$

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.3+514.851

DOI: 10.17223/00213411/67/3/10

**Эффективные механические свойства
двухмерного тетрахирального метаматериала***Л.Р. Ахметшин¹, К.В. Иохим¹, Е.А. Казанцева¹, И.Ю. Смолин¹¹ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследование посвящено изучению механических свойств двухмерного тетрахирального механического метаматериала. Для изучения влияния параметров элементарной ячейки метаматериала на его эффективные механические свойства проведено моделирование механического отклика разных образцов метаматериала, в которых геометрические параметры хиральной элементарной ячейки варьировались независимо друг от друга. Механическое поведение изучалось при одноосном сжатии образца. Моделирование проводилось численно с использованием метода конечных элементов. Исследовался вопрос влияния варьируемых параметров на поперечное отклонение подвижного торца образца, вызванное эффектом «одноосное сжатие – скручивание», и эффективные упругие свойства двухмерного метаматериала. Наибольшая деформация, оцениваемая по отклонению образца метаматериала от исходного положения, наблюдается при соразмерных значениях кольца и связок. Проанализирована корреляция изученных эффективных свойств, а также их связь с эффектом «одноосное нагружение – скручивание». Способность сопротивляться одноосному сжатию существенно возрастает, когда происходит касание соседних ячеек и затруднено скручивание тетрахиральных структур. Когда структура реализует механизм скручивания, проявляется свойство ауксетичности. Наименьшее значение эффективного коэффициента Пуассона было равно -0.1 . Данное свойство исчезает, когда нарушается тетрахиральная геометрия метаматериала.

Ключевые слова: численное моделирование, метод конечных элементов, соотношение структура – свойства, хиральная структура, одноосная деформация, механический метаматериал.

Введение

В последние десятилетия сформировалась новая парадигма в проектировании материалов, в которой макромасштабные свойства материала проектируются через соответствующую организацию его внутренней структуры [1]. Появился новый класс искусственных материалов, который принято называть метаматериалами [2]. Несмотря на большое число известных типов структур, число новых архитектур, лежащих в основе метаматериала, увеличивается. Чаще всего это комбинация двух уже известных архитектур, как, к примеру, показано в [3] и др.

Метаматериалы, как правило, состоят из периодически повторяющихся элементарных ячеек [4], спроектированных с высокой точностью благодаря появлению и развитию аддитивного производства [5]. Персонализированная трехмерная печать образцов позволяет создавать подобные структуры, которые практически не производятся традиционными методами [6, 7]. Другой способ создания образцов из метаматериала – изготавливать листы с перфорированным рисунком. Подобный способ подходит только для двухмерных образцов.

В качестве единицы повторяющейся структуры метаматериала используется базовая (элементарная) ячейка, заменяющая понятие элементарной ячейки в обычных кристаллических материалах [8]. Элементарные ячейки метаматериалов гораздо крупнее элементарных ячеек кристаллических обычных материалов. Ячеистые твердые тела широко используются в различных инженерных приложениях [9], в частности, в качестве защитных конструкций, как того требует модернизация традиционных материалов [10]. Таким образом, вместо однородных образцов [11] рассматривается сложная сэндвич-структура, состоящая как из однородной пластины, так и из метаматериала [12]. Преимущества использования метаматериалов в сэндвич-конструкциях заключаются в том, что они реализуют необычные свойства, такие как отрицательное значение коэффициента Пуассона (ауксетики) эффективной среды [13], отрицательная сжимаемость [14], отрицательная или повышенная жесткость [15], а также нелинейное распространение волн [16].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00402, <https://rscf.ru/project/23-29-00402/>.

Сравнительный анализ поляризационных процессов в композитных составах на основе поликристаллического ортоплюмбата свинца

Г.И. Грабко¹

¹ Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Проведено сравнительное исследование временных зависимостей темнового тока, протекающего через структуры металл – диэлектрик – металл на основе поликристаллического ортоплюмбата свинца Pb_3O_4 с различными связующими в зависимости от напряженности электрического поля и температуры. Полученные данные свидетельствуют о влиянии связующего вещества на потенциальные барьеры на границе между зернами кристаллитов и диэлектрическими прослойками из связующего материала. Обсуждение наблюдаемых эффектов проводится в рамках эстафетного механизма переноса заряда.

Ключевые слова: оксид свинца, композитные составы, поляризационно-релаксационные процессы, сравнительный анализ, локализованные состояния, время релаксации, эстафетный механизм переноса заряда.

Введение

Материалы оксидной системы $Pb-O$, наряду с халькогенидами IV группы, востребованы как в промышленной сфере, так и в области оптоэлектроники [1–3]. В последнее время ведутся интенсивные исследования, преследующие своей целью повышение эффективности существующих инфракрасных фотоприемников [4–6]. Для этого фоточувствительные слои данных приборов изготавливаются в виде пленок из халькогенидов свинца методом термической активации в атмосфере кислорода. Эффективность работы подобных изделий, по мнению авторов [6], может быть повышена за счет контроля процентного соотношения оксидосодержащей фазы $Pb-O$, образующейся в исследуемой системе $Pb-Se-O$, имеющей довольно сложный фазовый состав. Доскональное изучение данного вопроса связано с комплексным рассмотрением физических свойств и уточнением особенностей внутренней структуры фоточувствительных слоев как в целом, так и отдельных фаз и, в частности, оксидосодержащей составляющей $Pb-O$.

В качестве модельного объекта для этих целей достаточно давно используется ортоплюмбат свинца Pb_3O_4 [1]. Несмотря на то, что кристаллохимия Pb_3O_4 детально рассмотрена в ряде исследований, проведенных рентгено- и нейтронографическими методами [7, 8], и сходна со структурой шпинели (аналогичную структуру имеют соединения $MgSb_2O_4$, Fe_3O_4 и $MgAl_2O_4$), пленочные образцы, композитные составы на его основе и, в частности, в поликристаллическом состоянии являются мало изученными. Недостаточно изучены и процессы поляризации и деполяризации в тонкослойных изделиях из поликристаллического свинцового сурика [9–11]. А ведь именно накопление заряда как в объемных, так и поверхностных слоях рассматриваемых металлооксидных систем под воздействием различных внешних факторов оказывает существенное влияние на закономерности проводимости и другие явления в них.

Одними из информативных, хорошо апробированных методов, позволяющих определять и анализировать особенности процесса поляризации, являются исследования изотермических поляризационных токов, а также эстафетный механизм переноса заряда [12]. На основе обоих подходов интерпретировались экспериментальные результаты по изучению прохождения поляризационного тока через высокоомные полупроводниковые структуры различного химического состава [13–16]. В частности, в сэндвич-структурах на основе поликристаллических слоев ортоплюмбата свинца со связующим – цианэтиловым эфиром поливинилового спирта, наносимых на стеклянную подложку с проводящей пленкой на основе оксида индия, в которых в качестве второго электрода использовался аквадаг [16].

В связи с вышеизложенным, цель данной работы заключалась в проведении сравнительного анализа поляризационных процессов, происходящих под воздействием полей различной напряженности и температуры в сэндвич-структурах $Al-Pb_3O_4-Al$ на основе поликристаллических слоев ортоплюмбата свинца со связующим – кремнийорганическим лаком и в конденсаторных системах на основе поликристаллических слоев Pb_3O_4 со связующим – цианэтиловым эфиром поливинило-

Нелинейные диэлектрические свойства нитрата рубидия и нанокompозитов на его основе

С.В. Барышников¹, А.Ю. Милинский¹, Е.В. Стукова²

¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Приведены результаты исследования линейных и нелинейных диэлектрических свойств нанокompозита $\text{RbNO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. Показано, что для RbNO_3 , внедренного в поры матрицы Al_2O_3 , наблюдается понижение температуры фазового перехода и изменение коэффициента третьей гармоники, которые зависят не только от размера пор, но и от толщины стенок между порами.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, нитрат рубидия, нанокompозит, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход.

Введение

Основными функциями сегнетоэлектрических материалов, которые делают их полезными в практических приложениях, являются: наличие спонтанной поляризации P_s , высокая диэлектрическая проницаемость и зависимости этих характеристик от электрического поля. Один из самых чувствительных методов исследования зависимости $\epsilon'(E, T)$ и $P(E, T)$ – это метод нелинейной диэлектрической спектроскопии (НДС), который позволяет более полно изучать сегнетоэлектрические фазовые переходы [1, 2]. Основная идея этого метода заключается в генерации гармоник второго и высших порядков. Анализ зависимостей этих гармоник от температуры позволяет определить тип фазового перехода и вычислить коэффициенты разложения Ландау – Гинзбурга [3]. Возможность метода НДС определять температуру исчезновения спонтанной поляризации позволяет выполнять исследования как объемных, так и наноструктурированных сегнетоэлектриков.

К настоящему времени имеется большое число работ, посвященных исследованию объемных кристаллов, композитов и нанокompозитов на основе сегнетоэлектриков методом НДС. Среди композитов наибольший практический интерес представляют нанокompозиты на основе упорядоченных наноструктурных матриц, таких как пленки MCM-41, SBA-15, Al_2O_3 и т.д. Пленки оксида алюминия интересны тем, что в зависимости от технологии можно получить упорядоченные матрицы с диаметром пор от 10 до 350 нм и плотностью от 10 до 100 пор на 1 мкм^2 . Благодаря фиксированному размеру пор и расстояний между ними пористый оксид алюминия используется для формирования различных наноструктур.

Исследования полярных наноструктур, полученных на основе пористого оксида алюминия, были приведены в [4–10]. В работе [4] сообщалось о стабилизации сегнетоэлектрической фазы сегнетовой соли в пористом оксиде алюминия вплоть до температуры разложения (328 К), которая примерно на 30 К выше температуры верхнего фазового перехода в объемных образцах. В [5] было показано, что для сегнетовой соли в порах Al_2O_3 происходит расширение области существования сегнетоэлектрической фазы за счет повышения температуры верхнего и понижения температуры нижнего фазовых переходов. Изменение температур фазовых переходов в оксидных пористых матрицах наблюдалось также для TGS [6], DTGS [7], $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ [8], NaNO_2 [9], KNO_3 [10] и ряда других сегнетоэлектриков. Однако степень влияния различных факторов на свойства частиц в порах остается недостаточно исследованной.

В настоящей работе приводятся результаты исследований линейных и нелинейных диэлектрических свойств RbNO_3 и нанокompозитов на его основе, полученных путем внедрения RbNO_3 в пленки Al_2O_3 с различными соотношениями диаметров пор и толщинами стенок между ними.

Влияние γ -радиации на термоэлектрические свойства экструдированных образцов твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}$, легированных акцепторной примесью свинца

М.М. Тагиев^{1,2}, И.А. Абдуллаева³

¹ *Азербайджанский государственный экономический университет,
г. Баку, Азербайджанская Республика*

² *Институт физики им. Г.М. Абдуллаева Министерства науки и образования
Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика*

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

Исследовано влияние γ -радиации на термоэлектрические свойства образцов твердых растворов $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\langle\text{Pb}_x\rangle$ ($0.001 \leq x \leq 0.05$) при $\sim 77\text{--}300\text{ К}$. Выяснено, что при низких дозах γ -облучения твердого раствора $\text{Bi}_{0.85}\text{Sb}_{0.15}\langle\text{Pb}\rangle$ в нем образуются дефекты в виде одиночных межузельных атомов и одиночных вакансий, которые приводят к росту концентрации свободных электронов n , электропроводности σ , теплопроводности χ и уменьшению коэффициента термоЭДС α и Холла R_H . С ростом дозы облучения, в процессе последующей перестройки во время облучения, возможно образование сложных дефектов, что приводит к их объединению, уменьшению концентрации носителей тока и соответствующему изменению σ , α , χ и R_H .

Ключевые слова: *экструзия, γ -радиация, электропроводность, твердый раствор, дефекты.*

Введение

Твердые растворы систем Bi–Sb, особенно высокопрочные экструдированные материалы на основе этих систем, являются перспективными, наиболее эффективными материалами для создания низкотемпературных термо- и магнитотермоэлектрических преобразователей энергии. Исследования последних лет привели к значительному развитию и совершенствованию приборов термоэлектрического охлаждения на основе указанных систем [1–11]. Особый интерес с точки зрения перекрытия температурной области $\sim 150\text{--}250\text{ К}$, при которой известные сплавы как на основе твердых растворов висмут – сурьма, так и халькогенидов не сохраняют высокие значения добротности, представляют добавки примеси акцепторного типа, например, олова, свинца и т.д., так как они должны привести к повышению рабочих температур сплава [12, 13].

Радиационные термоэлементы являются структурной единицей сенсоров, используемых при измерении энергетических параметров различного излучения в диапазоне длин волн от 0.1 до 100 мкм [14–17]. В работе [18] по результатам холловских измерений выявлено, что γ -облучение на кристаллах кремния n -типа проводимости при азотной температуре (77.4 К) приводит к росту подвижности носителей тока. Эффект был объяснен введением при облучении акцепторных центров, частично нейтрализующих заряд ионных остовов, располагающихся в узлах решетки примесных атомов и атомов решетки [19].

Электронные приборы на основе твердых растворов систем Bi–Sb также часто используются и в условиях радиации. Радиационные дефекты (РД), созданные при γ -облучении, влияя на электрические и тепловые свойства полупроводниковых материалов при изготовлении этих приборов, существенно изменяют и параметры данных приборов [20–23]. Для применения твердых растворов Bi–Sb в более широком температурном интервале в составе электронных приборов в последние годы проводится легирование этих систем различными примесями (сложнолегирование) [24].

Расширение области применения в условиях радиации приборов на основе твердых растворов системы Bi–Sb является актуальной задачей современной фотоэлектроники. Поэтому исследование влияния радиационных дефектов на термоэлектрические свойства твердых растворов системы Bi–Sb, легированных акцепторными примесями, актуально.

Обобщение и систематизация полученных экспериментальных данных открывают возможности для разработки новых прогнозных моделей поведения исследованных материалов в условиях радиации. Это является одной из основных задач радиационного материаловедения.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2024. Т. 67. № 3

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 25.03.2024. Выпуск в свет 27.03.2024. Заказ № 5838.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 14.42. Уч.-изд. л. 16.14. 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

