

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

2·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021-3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Февраль, 2025

№ 2 (807)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ**ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ**

- Майер Г.В., Чайковская О.Н., Базыль О.К., Бочарникова Е.Н.** О возможности проявления квантово-запутанных электронно-возбужденных состояний в многоатомных молекулах5
- Авербух Б.Б., Авербух И.Б.** Распространение плоской электромагнитной волны через цилиндрический метаматериал конечной длины в модели молекулярной оптики11
- Носанов В.С., Аксенова Ю.В.** Спектроскопическое исследование эффективности генерации синглетного кислорода галогенпроизводными металлокомплексов дипиррометенов20

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

- Гладков С.О., Нагибин Н.С.** О вычислении коэффициента лобового сопротивления хорошо обтекаемого тела29

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Загуляев Д.В., Иванов Ю.Ф., Шляров В.В., Серебрякова А.А.** Физические факторы, способствующие повышению усталостной долговечности силумина методами комплексной электронно-ионно-плазменной обработки37
- Фролов Д.О.** К теории пластичности аморфных и поликристаллических сред53
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Литовченко И.Ю., Чапайкин А.С., Семин А.П., Миненко С.С.** Электронно-микроскопическое исследование структуры карбидного каркаса слоя наплавки быстрорежущей стали P18Ю65

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

- Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В.** О вынужденных колебаниях электрического поля в приземном слое атмосферы на гравитационно-волновых частотах релятивистских двойных звездных систем75

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

- Заворотний А.А., Ершов А.А., Филиппов В.В., Лузянин С.Е.** Контроль однородности полупроводниковых пленок в процессе проведения зондовых измерений удельной электропроводности82
- Васильев В.В., Вишняков А.В., Сабинина И.В., Сидоров Г.Ю., Стучинский В.А.** Влияние геометрического фактора пикселя на пространственное разрешение линейных фотоприемников СВИК-диапазона на основе материала кадмий – ртуть – теллур92

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Левин Ю.К.** Расчет заряда объемных нанопузырей в воде при балансе давлений Кулона и Лапласа99

CONTENTS**OPTICS AND SPECTROSCOPY**

Mayer G.V., Tchaikovskaya O.N., Bazyl O.K., Bocharnikova E.N. The physical manifestation of quantum-entangled electronically excited states in polyatomic molecules	5
Averbukh B.B., Averbukh I.B. Propagation of a plane electromagnetic wave through a cylindrical metamaterial of finite length in the molecular optics model	11
Nosanov V.S., Aksenova Iu.V. Spectroscopic study of the efficiency of singlet oxygen generation by halogen derivatives of dipyrromethene metal complexes	20

THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

Gladkov S.O., Nagibin N.S. On the calculation of the drag coefficient of a well-streamlined body	29
---	----

CONDENSED-STATE PHYSICS

Zaguliaev D.V., Ivanov Yu.F., Shlyarov V.V., Serebryakova A.A. Physical factors contributing to increasing the fatigue durability of silumin by methods of comprehensive electron-ion-plasma treatment	37
Frolov D.O. On the theory of plasticity of amorphous and polycrystalline media	53
Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Litovchenko I.Yu., Chapaikin A.S., Semin A.P., Minenko S.S. Electron microscopic study of the structure of the carbide framework of the surfacing layer of high-speed steel R18Yu	65

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Isakevich D.V. On forced electric field oscillations in the ground layer of the atmosphere at gravity-wave frequencies of relativistic binary stellar systems	75
--	----

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Zavorotnii A.A., Ershov A.A., Filippov V.V., Luzyanin S.E. Monitoring the homogeneity of semiconductor films during probe measurements of electrical conductivity	82
Vasiliev V.V., Vishnyakov A.V., Sabinina I.V., Sidorov G.Yu., Stuchinsky V.A. Effect of pixel geometric factor on the spatial resolution of linear MWIR mercury-cadmium-tellurium-based photodetectors	92

BRIEF COMMUNICATIONS

Levin Yu.K. Calculation of charge of bulk nanobubbles in water under the balance of Coulomb and Laplace pressures	99
--	----

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 539.194:535.37

DOI: 10.17223/00213411/68/2/1

О возможности проявления квантово-запутанных электронно-возбужденных состояний в многоатомных молекулах*Г.В. Майер¹, О.Н. Чайковская¹, О.К. Базыль¹, Е.Н. Бочарникова¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На примере молекулы нафталина проведено рассмотрение природы и общих принципов формирования электронно-возбужденных состояний молекул альтернантных углеводородов с целью установления возможности проявления квантово-запутанных электронных состояний. Установлено наличие связанных пар электронно-возбужденных состояний, описываемых суммой и разностью волновых функций одноэлектронных возбужденных конфигураций разного типа, что позволяет соотнести эту ситуацию с наличием квантово-запутанных электронных состояний. Предложен эксперимент, подтверждающий существование и возможность реализации квантово-запутанных электронно-возбужденных состояний молекул альтернантных углеводородов.

Ключевые слова: квантовая запутанность, электронные состояния, нафталин, спектры поглощения, коллапс волновой функции.

Введение

Свыше 40 лет назад Р. Фейнман [1] предложил для изучения объектов квантовой физики использовать сами эти объекты и квантовые свойства, с существенным использованием понятия суперпозиции состояний, что послужило толчком развития квантовых технологий.

На сегодня квантовые технологии (квантовая связь, квантовые компьютеры, квантовая криптография) уже вышли из области чисто теоретических исследований на уровень серьезных технологических применений, например, уже существуют квантовые линии связи [2, 3].

В теоретической основе квантовых технологий лежат представления о так называемых запутанных состояниях, достаточно хорошо известно о таких носителях запутанных состояний, как фотоны и атомы или ионы. В частности, одним из распространенных методов получения квантово-запутанных состояний является расщепление мощного лазерного луча света внутри кристалла с нелинейными оптическими свойствами [2, 3].

Однако логика развития науки указывает на перспективность исследований возможности проявления квантово-запутанных состояний в более сложных молекулярных системах, например, в люминесцирующих молекулах органических соединений. В этом контексте уместно привести пример, когда одновременно с созданием первого лазера на кристалле рубина (Т. Мейман, 1960) вышла публикация А.П. Иванова (Институт физики АН БССР) об условиях получения инверсной заселенности в растворах сложных молекул (1960), а через несколько лет был создан первый лазер на красителях (фталоцианины) с накачкой рубиновым лазером (П. Сорокин и Дж. Ланкард, 1966 и независимо чуть позже Ф. Шефер и В. Шмидт, Германия, и Б.И. Степанов, А.Н. Рубинов, СССР) [4].

Отметим также обсуждения перспективности использования сложных молекул как систем приема и переработки информации [5, 6] и рабочих сред молекулярных компьютеров [7]. В этой связи, в рамках поставленной задачи, для установления физических причин и механизмов формирования и проявления квантовой запутанности в молекулах органических соединений необходимо целенаправленное понимание природы и общих принципов формирования схем электронно-возбужденных состояний сложных молекул.

* Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-557 от 25.04.2024).

Распространение плоской электромагнитной волны через цилиндрический метаматериал конечной длины в модели молекулярной оптики*

Б.Б. Авербух¹, И.Б. Авербух¹

¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Среда скомпонована из плоскопараллельных монослоев, состоящих из элементов Гюйгенса. Рассмотрен цилиндр из конечного числа монослоев (т.е. конечной длины). Получены выражения для отраженного поля, поля в цилиндре и за цилиндром. При определенных условиях такая среда может вести себя как оптическое магнитное зеркало, усиливая падающее на нее излучение. Рассмотрено преобразование электромагнитного излучения зонной пластинкой Френеля и состоящими из электрических диполей радиальной и секториальной зонными пластинками толщиной в один монослой.

Ключевые слова: молекулярная оптика, метаматериал, цилиндр конечной длины, стержень, монослой диполей, элементы Гюйгенса, оптическое магнитное зеркало, радиальная и секториальная зонные пластинки.

Введение

Метаматериалы обычно представляют собой системы резонансных включений во вмещающей их диэлектрической матрице. Формы включений могут быть различными (диск [1, 2], куб [3], сфера [4], пирамида [5] и др.). Размеры включений предполагаются много меньшими длины волны излучения λ . Экспериментально такие среды создаются, например, в виде слоистых сред.

Задача о распространении электромагнитного излучения в такой среде обычно рассматривается макроскопически в рамках классической электродинамики, исходя из уравнений Максвелла. Среда характеризуется эффективными значениями диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей или показателем преломления [1, 2, 6]. Параметры включений определяются их размерами, формой и рабочей частотой. Широко используются численные методы.

Но теория оптических явлений, построенная на уравнениях Максвелла, не объясняет появление отраженной и преломленной волн. Применение численных методов оставляет скрытыми детали физических процессов при формировании этих волн. Механизм формирования отраженной и преломленной волн дает только микроскопический анализ. В молекулярной оптике среда – это вакуум, в котором находятся атомы вещества, моделируемые в простейшем случае диполями. Под действием внешнего поля эти диполи излучают когерентные электромагнитные волны. Интерференция этих волн определяет структуру электромагнитного поля в среде, перед ней и за ней.

Формирование отраженных и преломленных волн при распространении электромагнитного излучения в метаматериале в модели молекулярной оптики рассмотрено в [7, 8]. Среда считалась полубесконечными или конечными в продольном направлении и бесконечными в поперечных. В данной работе на основе микроскопического подхода рассмотрено распространение электромагнитного излучения через среды с конечными размерами. В частности, цилиндр конечной длины (в этом случае аналитическое решение Ми отсутствует [9]). Рассмотрены также круговые зонные пластинки (Френеля, радиальная и секториальная с фазой Панчаратнама – Берри) на основе метаматериалов толщиной в один монослой. Подобные структуры представляют большой интерес, в частности, с точки зрения создания на их основе различных приборов и устройств [10–12].

Случай цилиндрического стержня

Пусть среда – это цилиндр с осью z и радиусом основания R , составленный из плоскопараллельных монослоев. Монослои состоят из элементов Гюйгенса и лежат в плоскостях x_0 , пересекающих ось z в точках z_1, z_2, z_3, \dots . Расстояния между монослоями по оси z одинаковы и равны a , причем $a \ll \lambda$. Элементы Гюйгенса – это частицы с электрической ($A_d = A_d' - iA_d''$) и магнитной

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 1 июня 2021 г. № 075-02-2021-1389, дополнительное соглашение с Минобрнауки России от 4 февраля 2022 г. № 075-02-2022-879. Соглашение от 16.02.2023 г. № 075-02-2023-932. Соглашение от «28» февраля 2024 г. № 075-02-2024-1432.

Спектроскопическое исследование эффективности генерации синглетного кислорода галогенпроизводными металлокомплексами дипиррометенов*

В.С. Носанов¹, Ю.В. Аксенова¹

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

Представлены результаты экспериментального изучения спектров поглощения и люминесценции галогензамещенных металлокомплексов дипиррометенов в ряду полярных растворителей. Также исследованы их фотосенсибилизационные свойства косвенным методом с использованием молекулы ловушки. Определены основные спектроскопические параметры, такие как максимумы полос поглощения и флуоресценции, Стоксов сдвиг, квантовый выход флуоресценции, эффективность генерации синглетного кислорода. Рассмотрены перспективы практического использования данных соединений в области фотодинамической терапии и фотокатализа химических реакций.

Ключевые слова: дипиррометеновые комплексы, BODIPY, спектроскопия, флуоресценция, фотосенсибилизация, синглетный кислород.

Введение

На сегодняшний день активно развивается направление фотоники, связанное с поиском современных материалов, основанных на сложных органических молекулах. Особый интерес в этом плане представляют дипиррометеновые комплексы и их производные. Известно, что алкилзамещенные комплексы борфторидных дипиррометенов (BODIPY) имеют большие коэффициенты молярной экстинкции, эффективную люминесценцию, высокую фото- и химическую стабильность [1–3]. В свою очередь, введение тяжелых атомов в структуру дипиррометенов влияет на проявляемые оптические свойства и значительно снижает эффективность люминесценции [4, 5].

Известно, что дипиррометены могут также образовывать устойчивые комплексы с d-металлами, например, цинком и кадмием, данные соединения имеют повышенную оптическую активность ввиду фактического удвоения хромофорного остова [6, 7]. Подобные металлокомплексы обладают интенсивными хромофорными свойствами, устойчивы к действию различных реагентов, а также термостабильны, что обусловлено структурными особенностями их координационных узлов [8, 9]. Подобные системы синтезированы недавно и являются менее изученными по сравнению с комплексами BODIPY.

Дипиррометеновые комплексы, как борфторидные, так и образованные d-металлами (цинк и кадмий), находят широкое применение в качестве флуоресцентных зондов и маркеров [10, 11], оптических сенсоров [12–14] и фотосенсибилизаторов для фотодинамической терапии [15, 16]. На сегодняшний день идет поиск более эффективных соединений для использования в данных оптических устройствах, в том числе на основе галогензамещенных дипиррометеновых комплексов. В связи с этим возникает необходимость исследовать их спектроскопию, что позволит не только установить взаимосвязь структуры исследуемых соединений и их свойств, но и контролировать происходящие фотофизические процессы.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны производные борфторидных, цинковых и кадмиевых комплексов дипиррометенов, структурные формулы и обозначения которых приведены на рис. 1. Данные комплексы синтезированы в Институте химии растворов РАН (г. Иваново), состав и идентичность подтверждены методами масс-спектрометрии, ИК- и ЯМР-спектроскопии [17, 18]. Исследуемые соединения различаются как комплексообразователем (металлы: бор, цинк и кадмий), так и лигандами, в структуре которых можно выделить бромзамещенные (атомы брома располагаются в α - и β -положениях) и йодзамещенные (разное количество атомов йода в β -положениях) соединения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) (НИР № НУ 2.0.7.22 МЛ).

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 533.6, 538.9

DOI: 10.17223/00213411/68/2/4

**О вычислении коэффициента лобового сопротивления
хорошо обтекаемого тела**С.О. Гладков¹, Н.С. Нагибин¹

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

Подробно изложены результаты вычисления коэффициента лобового сопротивления хорошо обтекаемого осесимметричного (относительно направления течения континуума) твердого однородного тела. Все расчеты основаны на использовании формального математического определения коэффициента C_x в виде отношения силы сопротивления к силе Бернулли. При этом число Маха считается малым, а угол атаки равен нулю. Полученная зависимость проиллюстрирована графически в виде функции от числа Рейнольдса, линейного размера тела, относительного размера тела, а также ряда других входящих в нее параметров.

Ключевые слова: коэффициент лобового сопротивления, динамическая вязкость, число Рейнольдса.

Введение

При решении классических задач, например, когда речь идет о шаре, как в задаче Стокса, или о цилиндрическом теле, как в задаче Осеена, и подобных, вопрос о вычислении коэффициента лобового сопротивления в случае небольших чисел Маха, как правило, не возникает. Однако, если направление потока обтекаемого континуума в случае осесимметричных тел и, в частности, цилиндров, ориентировано не вдоль оси симметрии, а под некоторым углом α , который представляет собой угол атаки, то в этом случае появляется острая необходимость вычисления коэффициента лобового сопротивления, представляющего собой сложную функцию от всех входящих в него параметров (см., к примеру, статьи и монографии [1–8]).

Когда речь идет об исследовании, например полета космических аппаратов или самолетов, этот коэффициент в практическом отношении играет чрезвычайно важную роль в виде функции от числа Маха M , числа Рейнольдса R и угла атаки α .

В настоящей работе речь пойдет об аналитическом вычислении коэффициента сопротивления в случае тела, представляющего собой по форме каплю. Как отмечается в монографии [9], такая трехмерная форма представляет собой идеально обтекаемую поверхность. При этом подразумевается, что число Маха мало, а угол атаки равен нулю и, следовательно, мы имеем дело с чисто лобовым обтеканием. Положив угол атаки равным нулю, мы тем самым несколько упрощаем нашу задачу, что формально является первым шагом запланированного решения.

Опираясь при решении этой задачи мы будем на работу [10]. Так же как и в [10], речь пойдет о центральном сечении капли, толщину которого h будем считать конечной. Функциональную зависимость контура этого двухмерного сечения, так же как и в [10], обозначим функцией $\eta(x)$.

Что касается самого коэффициента лобового сопротивления, то его можно ввести, исходя из общепринятого определения (см., монографию [9]), с помощью соотношения

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho u^2 S}, \quad (1)$$

где ρ – плотность континуума; u – скорость течения; S – полная площадь поверхности; F_x – сила сопротивления.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.789: 538.911

DOI: 10.17223/00213411/68/2/5

Физические факторы, способствующие повышению усталостной долговечности силумина методами комплексной электронно-ионно-плазменной обработки*Д.В. Загуляев¹, Ю.Ф. Иванов², В.В. Шляров¹, А.А. Серебрякова¹¹ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия² Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Вакуумным плазменно-ассистированным (плазма аргона) электродуговым распылением катода из технически чистого титана марки ВТ1-0 на поверхности образцов силумина марки АК5М2, подготовленных для усталостных испытаний, сформирована пленка титана толщиной 5 мкм с последующим облучением полученной системы импульсным электронным пучком. Показано, что пленка титана имеет нанокристаллическую столбчатую структуру с поперечным размером столбиков 20–30 нм. Столбики сформированы кристаллитами, размеры которых 5–7 нм. Выполнены усталостные испытания и показано, что усталостная долговечность системы «пленка/подложка» существенным образом зависит от плотности энергии пучка электронов (E_S). Выполнены исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры системы «пленка/подложка», облученной импульсным электронным пучком, и высказаны предположения о физических факторах, оказывающих влияние на усталостную долговечность силумина марки АК5М2.

Ключевые слова: силумин АК5М2, титан, система «пленка/подложка», усталостная долговечность, плазменно-ассистированное напыление, импульсный электронный пучок, элементный и фазовый состав, дефектная субструктура.

Введение

В настоящее время уделяется большое внимание разработке новых методов модификации металлов и сплавов. Модификация осуществляется различными способами: ионные пучки, обработка при помощи плазмы, лазера и ультразвука, нанесение покрытий и др.

Наибольшую эффективность представляет сочетание различных методов, нанесение покрытий и дальнейшая обработка энергетическими воздействиями. Например, в работе [1] показан эффект нанесения покрытия Al–Ti–Ni на сталь, которая эксплуатируется в условиях чрезвычайной подверженности коррозии и образования коррозионных трещин. Модификация путем создания покрытия и дальнейшего лазерного переплавления позволила получить поверхностный слой, обладающий большим сжимающим напряжением, сдерживающим его растрескивание, а также положительное изменение коррозионных потенциалов, что увеличило коррозионную стойкость сформированной системы. В исследованиях [2, 3] представлено сравнение изменения усталостной долговечности сплава алюминия 7075-T6 с нанесением низкотемпературного твердого покрытия DLC (алмазоподобный углерод) и при отсутствии покрытия. Выявлено, что такое сочетание позволяет повысить трибологические характеристики и коррозионную стойкость без ущерба для механических свойств подложки. Однако установлено снижение усталостной долговечности в результате формирования покрытия.

Согласно исследованиям [4–6], одним из наиболее эффективных методов является электронно-пучковая обработка (ЭПО). Высокая энергетическая эффективность, воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования, а также повышенная однородность плотности энергии по сечению потока – преимущества ЭПО по сравнению с остальными методами модифицирования.

Существует также способ легирования поверхностного слоя с помощью напыления тонкой пленки на поверхность материала вакуумно-дуговым методом и последующего переплавления пленки с поверхностным слоем (подложкой) электронным пучком [7]. Значительного эффекта в

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

К теории пластичности аморфных и поликристаллических сред*Д.О. Фролов^{1,2}¹ Тульский государственный университет, г. Тула, Россия² ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия

Исследование посвящено, главным образом, аморфным материалам (в том числе поликристаллам) различной природы. Показано, что в модели пластичности Марченко – Мисбах в случае возникновения в объеме материала растяжений или сжатий появляется дополнительное условие, касающееся положительной определенности диссипативной части полного лагранжиана. В результате такого эффекта в континууме может наблюдаться неупругое изменение плотности, которое, в свою очередь, может быть связано с перемещением вакансиоподобных дефектов, перераспределением их в структуре материала при его деформации. Отмечены изменения в уравнениях модели, возникающие в результате возможного залечивания имеющихся структурных несовершенств в исследуемом объеме или микроскопического скопления точечных дефектов в локальных областях материала. Получена поправка к уравнению Максвелла для вязкоупругих тел. Затронут вопрос о вычислении внутреннего трения на основе квадратичной формы, моделирующей пластичное поведение материала. Для механизма микроползучести в поликристаллах раскрыта природа реологического коэффициента η модели. На этой основе получена формула высокотемпературного фона внутреннего трения, контролируемого диффузией атомов примеси. На примере изучения ползучести Кобле установлено влияние размера зерна на фон внутреннего трения.

Ключевые слова: аморфное тело, формализм Лагранжа, квадратичная форма, диссипативная функция, пластичность, теорема Сильвестра, внутреннее трение, реология, поликристалл.

Введение

Считается, что пластическая деформация – это «функция» процесса деформирования материала. То есть даже при малых деформациях в материале может проявляться это удивительное свойство – пластичность. Физическая картина пластичности пока полностью не раскрыта [1], особенно это касается аморфных материалов. Поэтому исследование пластичности в различных по своей природе материалах (аморфных, поликристаллических) представляет сегодня большую научную задачу.

В 2011 г. В.И. Марченко и Шоки Мисбах [2] опубликовали интересную модель пластичности аморфных материалов в рамках механики сплошной среды. Авторам удалось построить теорию не прибегая непосредственно к понятию дислокации. Это дает возможность взглянуть на поведение пластичного материала в общих терминах, характеризующих обычную кинематику и динамику пластичности. Реологические свойства материала учитываются в модели посредством коэффициентов, вводимых на континуальном уровне. Наряду с упругими свойствами, предложенная модель учитывает вязкие и пластичные характеристики материала. То есть диссипативная функция дается суммой функции Рэлея и квадратичной формы, отвечающей за пластичность. Однако построенная авторами модель предложена для сплошной среды, в которой след тензора пластической дисторсии тела, образованной как разность полной и упругой дисторсии, $\omega_{kk}^{pl} = 0$. Данное ограничение [3, § 29] справедливо до тех пор, пока пластическое течение происходит без растяжений или сжатий, тем самым идеализируя материальный континуум. Представить себе такую ситуацию (особенно при нагревании материала) достаточно трудно, поскольку неоднородная деформация может сопровождаться образованием условий для возникновения областей растяжения или сжатия в силу неоднородности поля напряжений, а также перемещением точечных дефектов в объеме, что, в свою очередь, может приводить к неупругому изменению плотности, изменению демпфирующей способности материала или росту высокотемпературного фона внутреннего трения [4].

Если ввести для описания процесса пластической деформации тензор плотности пластического потока $j_{ik}^{pl} = -\dot{\omega}_{ik}^{pl}$, то развитие пластичности (а на начальном этапе – микропластичности [5]) может, как мы думаем, и приводить к ситуации, характеризуемой ненулевым следом $j_0 = j_{kk}^{pl}$.

* Работа выполнена по теме Государственного задания FFSG-2024-0016, № государственной регистрации 124020500064-2.

Электронно-микроскопическое исследование структуры карбидного каркаса слоя наплавки быстрорежущей стали P18Ю*

Ю.Ф. Иванов¹, В.Е. Громов², И.Ю. Литовченко³,
А.С. Чапайкин², А.П. Семин², С.С. Миненко²

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

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

³ *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю на сталь 30ХГСА сформированы слои толщиной до 10 мм. Методами сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показано, что наплавленный слой имеет структуру каркасного типа, сформированную зернами твердого раствора на основе α -железа с расположенными по границам протяженными прослойками карбидной фазы состава M_6C (Fe_3W_3C), Cr_3C_2 и Cr_7C_3 . Выявлена деградация карбидного каркаса по мере приближения к зоне контакта наплавленного слоя и подложки с формированием поликристаллической структуры с расположенными в объеме и по границам зерен глобулярными частицами состава M_6C .

Ключевые слова: плазменная наплавка, порошковая проволока, карбидный каркас, элементный и фазовый состав, дефектная субструктура.

Введение

В машиностроительной, металлургической и горнодобывающей отраслях промышленности для защиты изделий от износа, коррозии, динамических нагрузок и других видов внешних воздействий широко используется наплавка теплостойкими сталями высокой твердости (типа P18), обладающая высокими функциональными свойствами [1, 2]. Получение наплавки с высокими эксплуатационными свойствами, обеспечивающими надежность и долговечность работы изделий в сложных условиях, является актуальной фундаментальной задачей, имеющей важное практическое значение.

Основным фактором, определяющим упрочнение, является материал наплавки, который отвечает за требуемые параметры поверхности. Использование азота в качестве легирующего элемента наплавки позволяет значительно повысить эксплуатационные свойства за счет роста микротвердости структурных составляющих наплавки [3–6]. Обоснованный выбор материала наплавки должен базироваться на результатах тщательных исследований структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств и их изменения при последующей термической обработке методами современного физического материаловедения [7–9].

В отечественной и зарубежной литературе недостаточно надежных данных о физической природе и механизмах повышенной износостойкости и твердости быстрорежущей стали при формировании наплавки и последующей термообработке. Это во многом связано с отсутствием анализа результатов просвечивающих электронно-микроскопических (ПЭМ) исследований, получение которых из-за фазового состава и высокой твердости быстрорежущей стали технически и методически сложно реализовать [10–12]. ПЭМ-исследования, являющиеся современным высокоинформативным методом физического материаловедения, позволяют сформировать банк данных о структурно-фазовых состояниях и дефектной субструктуре наплавленного слоя.

Цель настоящей работы – исследование структуры, элементного и фазового состава карбидного каркаса, образующегося при формировании наплавленного на сталь 30ХГСА слоя твердого сплава P18Ю.

Материал и методики исследования

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю диаметром 3.7 мм на сталь 30ХГСА, мас. %: С – 0.3; Cr – 0.9; Mn – 0.8; Si – 0.9. Химический состав сплава P18Ю, мас. %: С – 0.87; Cr – 4.41; W – 17.00; Mo – 0.10; V – 1.50; Ti – 0.35; Al – 1.15; N – 0.06. Плазменная наплавка производилась с расходом защитного

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК [530.12+530.145](082)

DOI: 10.17223/00213411/68/2/8

**О вынужденных колебаниях электрического поля
в приземном слое атмосферы на гравитационно-волновых частотах
релятивистских двойных звездных систем**Л.В. Грунская¹, В.В. Исакевич², Д.В. Исакевич²

¹ *Владимирский государственный университет
имени Николая Григорьевича и Александра Григорьевича Столетовых,
г. Владимир, Россия*

² *ООО «Собственный вектор», г. Владимир, Россия*

Работа посвящена изучению вынужденных колебаний вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы на удвоенных частотах обращения известных релятивистских двойных звездных систем (РДЗС) с малым эксцентриситетом. На комплексных временных рядах, мнимая часть которых является первой конечной разностью исходного многолетнего временного ряда, исследована спектральная локализация собственных векторов его эрмитовой матрицы плотности. Показано (по критерию Смирнова – Колмогорова), что амплитудные спектры собственных векторов на частотах гравитационного излучения РДЗС имеют значимо более высокую степень спектральной локализации.

Ключевые слова: *релятивистские двойные звездные системы, электрическое поле Земли, айгеноскопия, первая конечная разность, спектральная локализация, индекс когерентности.*

*Посвящается светлой памяти
Багрова Владислава Гавриловича*

Введение

В многочисленных работах авторов, в том числе [1, 2], с использованием анализатора собственных векторов и компонент сигнала (полезные модели № 116242RU, 178399RU) в вертикальной компоненте напряженности электрического поля Земли инфранизкочастотного диапазона выявлены и исследованы некоррелированные составляющие, спектрально-локализованные на частотах гравитационного излучения известных релятивистских двойных звездных систем (РДЗС). Эффект проявляется в сужении амплитудного спектра некоррелированных составляющих электрического поля, спектрально-локализованных на частотах гравитационного излучения РДЗС, по отношению к другим частотам спектральной локализации некоррелированных компонент. Обнаружение указанного эффекта стало возможным благодаря тому, что РДЗС в течение последних десятилетий были объектом пристального изучения, и их параметры (включая периоды обращения и эксцентриситеты) хорошо известны [3–6] и табулированы [7], а также благодаря настойчивости авторов, постоянно возвращавшихся к этой задаче в течение последних двух десятилетий.

Первоначальные попытки выявить эффект с использованием классического спектрального анализа [8] оказались неудачны, хотя позволили выявить влияние лунных приливов на электрическое поле в приземном слое атмосферы. Эта неудача, с одной стороны, свидетельствует о том, что искомые компоненты не являются когерентными, а с другой – стимулировала разработку анализатора, позволяющего выявлять спектрально-локализованные некогерентные энергетически доминирующие компоненты. Это и привело к появлению нового класса анализаторов – анализаторов (спектра) собственных векторов и компонент сигнала, с помощью которых и были выявлены уже упомянутые эффекты.

Использование нового класса анализаторов всегда требует некоторого переосмысления подходов к процедурам анализа, в том числе – к процедуре сравнения результатов, получаемых с использованием нового анализатора в классических ситуациях [9].

В отличие от анализаторов с фиксированными базисами, к числу которых относится и классический спектроанализатор, в айгеноскопе, как и в методе «Гусеница» [10], принимаемый сигнал

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 537.311.322; 53.008.23

DOI: 10.17223/00213411/68/2/9

**Контроль однородности полупроводниковых пленок
в процессе проведения зондовых измерений удельной электропроводности**А.А. Заворотный¹, А.А. Ершов², В.В. Филиппов^{3,4}, С.Е. Лузянин³¹ *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*² *Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*³ *Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского,
г. Липецк, Россия*⁴ *Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал)
Московского государственного университета технологий и управления
им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Липецк, Россия*

Рассмотрены основные выражения, позволяющие определять значение удельной электропроводности в полупроводниковых пластинах и пленках прямоугольной и круглой формы при двухзондовом методе измерений на постоянном токе. На основе асимптотического анализа получены приближенные удобные для расчетов формулы для разности потенциалов между измерительными зондами. Показано, что в большинстве практически используемых случаев предлагаемые асимптотические формулы можно использовать без увеличения измерительной погрешности в случаях контроля однородности распределения электрофизических параметров исследуемых образцов.

Ключевые слова: полупроводниковый кристалл, двухзондовый метод, удельная электропроводность, граничные условия, асимптотический анализ.

Введение

Современное состояние развития полупроводниковой электроники предъявляет к используемым материалам все более жесткие требования по качеству изготавливаемых твердотельных кристаллов. Так, на первоначальном этапе построения интегральных микросхем с нанометровыми размерами отдельных структурных элементов однородность состава материалов является главным критерием качества итогового изделия [1, 2]. Необходимо отметить, что в современных условиях сокращения базовых размеров $p-n$ -переходов до 2–10 нм [3, 4] проблемы обеспечения высококачественных контактов металл – полупроводник в значительной степени актуализируются, поскольку на микро- и наноуровнях необходимо учитывать любые паразитные явления, влияющие на работу и электрические свойства производимых электронных элементов и устройств.

Указанные проблемы твердотельной электроники ставят перед исследователями довольно обширный круг научно-технических задач, в том числе совершенствование существующих методов измерений основных электрофизических параметров кристаллов или создание новых, отличающихся большей точностью и надежностью. Среди наиболее распространенных способов контроля ведущую роль играют контактные методы при стационарных электрическом и магнитном полях [5]. Способы контактных измерений, описанные в [5], дают довольно надежные результаты, при этом ряд произведенных модификаций существующих методик [6] позволил снизить систематическую погрешность измерений основных кинетических коэффициентов кристаллов с 6–8 до 2–4%.

При проведении качественных измерений одного из основных электрофизических параметров полупроводниковых кристаллов – удельной электропроводности (или удельного сопротивления) исследователями предъявляются высокие требования к надежности измерительных контактов металл – полупроводник. Важной характеристикой таких контактов, определяющих границы их применения, является величина сопротивления электрическому току.

Цель данной работы – повышение точности двухзондового метода локального контроля однородности удельной электропроводности в области полупроводниковых образцов прямоугольной формы и круглых пластин.

Влияние геометрического фактора пикселя на пространственное разрешение линейных фотоприемников СВИК-диапазона на основе материала кадмий – ртуть – теллур

В.В. Васильев¹, А.В. Вишняков¹, И.В. Сабинаина¹, Г.Ю. Сидоров¹, В.А. Стучинский¹

¹ *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Экспериментально исследовано влияние величины отношения размера диода к размеру пикселя на пространственное разрешение линейных фотовольтаических фотоприемников (ФП) средневолнового инфракрасного (СВИК) диапазона на основе материала кадмий – ртуть – теллур (КРТ). Измерения, проведенные на линейных ФП формата 288×4 элементов, изготовленных с применением молекулярно-лучевой эпитаксии, показали, что разрешение изученных ФП на основе материала КРТ с длиной диффузии фотоносителей ~ 40 мкм возрастает с увеличением размера диодов при постоянном шаге пикселей.

Ключевые слова: *HgCdTe, фотоприемники средневолнового инфракрасного диапазона, разрешение фотоприемника, фотодиод, пиксель, геометрический фактор пикселя, функция рассеяния линии, частотно-контрастная характеристика, моделирование методом Монте-Карло, эквивалентная шуму разность температур.*

Введение

Линейные и матричные фотоприемные структуры фокальной плоскости на основе материала кадмий – ртуть – теллур (КРТ) находят широкое применение во многих областях науки и техники в силу возможности подстройки спектральной чувствительности фоточувствительного материала на желаемый диапазон путем изменения состава [1–6]. Кроме того, такие фотоприемники характеризуются высокими значениями эксплуатационных параметров (чувствительность, обнаружительная способность, разрешение и др.). Дальнейшее увеличение значений таких параметров предполагает оптимизацию геометрии элементов фотоприемных структур и характеристик их фоточувствительного материала. Отметим, что достаточно часто выбор оптимальных значений того или иного параметра в задаче с двумя целевыми характеристиками носит характер компромисса. Такая ситуация возникает, например, тогда, когда влияние изменения величины оптимизируемого параметра на разные целевые характеристики имеет разный знак. Так, уменьшение длины диффузии фотоносителей в слое фоточувствительного материала матричных фотоприемников способствует лучшему разрешению, одновременно ухудшая фотосигнал [7].

Предметом настоящей работы являлось экспериментальное изучение зависимости пространственного разрешения линейных КРТ-фотоприемников от геометрического фактора (ГФ) пикселя – отношения размера диода к размеру пикселя. Величина ГФ варьировалась путем изменения размера диодов при фиксированном размере пикселей. Для случая матричных фотоприемных устройств (ФПУ) такая зависимость ранее изучалась в расчетных работах [8, 9], в которых было получено, что увеличение латеральных размеров фотодиодов при постоянном размере пикселей приводит в определенных условиях к улучшению разрешения фотоприемника на частоте Найквиста. Отметим здесь, что, поскольку типичные линейные ФПУ, реализующие режим работы с временной задержкой накопления (ВЗН), представляют собой некоторый фрагмент матрицы, можно полагать, что должно существовать подобие между выводами, которые могли бы быть сделаны в обсуждаемом отношении для матричных и линейных ФПУ.

Принятый в настоящее время способ описания пространственного разрешения фотоприемных структур фокальной плоскости базируется на использовании частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) (*англ.* – Modulation Transfer Function (MTF)), характеризующей степень уменьшения глубины пространственной модуляции регистрируемого фотоприемником фотосигнала по сравнению с модуляцией засветки из-за размытия изображения на высоких пространственных частотах [10–12]. Значение ЧКХ на данной пространственной частоте f представляет собой отношение амплитуды гармоника фотосигнала с данной частотой и амплитуды гармоника засветки с той же частотой, нормированное таким образом, чтобы это отношение было равно единице на нулевой пространственной частоте. Это отношение спадает на больших частотах, периодически обращаясь в нуль вблизи частот, кратных удвоенной частоте Найквиста (см., например, [13]).

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 544.33; 544.34

DOI: 10.17223/00213411/68/2/11

Расчет заряда объемных нанопузырей в воде при балансе давлений Кулона и Лапласа

Ю.К. Левин¹¹ Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Показана возможность стабилизации объемных нанопузырей в воде за счет баланса на их границе поверхностного натяжения (давления Лапласа $P_L(r_0)$) и электростатического давления $P(r_0)$ за счет заряда пузыря. Стабильность нанопузыря повышает окружающий его гидратный Δ -слой ($\Delta \approx 1$ нм). Низкая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon_1 \approx 3$) этого слоя повышает давление $P(r_0)$ на границе нанопузыря, способствуя его стабильности. Определены размеры и заряд нанопузыря, при $P_L(r_0) = P(r_0)$, причем концентрация раствора слабо влияет на это равенство.

Ключевые слова: диэлектрическая жидкая среда, кулоновское и лапласовское давление, аномальная диэлектрическая проницаемость, гидратный слой, размер и заряд нанопузырей.

Интерес к объемным нанопузырям (ОНП) в воде связан с перспективами их применения в различных областях [1, 2]. Стабильность пузыря может обеспечить баланс кулоновского давления заряда ОНП:

$$P_C(r_0) = \frac{q_0^2}{32\pi^2 \epsilon_0 \epsilon r_0^4} \quad (1)$$

и давления Лапласа:

$$P_L(r_0) = 2\alpha / r_0, \quad (2)$$

где r_0 и q_0 – радиус и заряд ОНП соответственно; ϵ – диэлектрическая проницаемость воды; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\alpha = 0.072$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды.

Формула (1) определяет кулоновское давление заряда ОНП $P_C(r_0)$ в однородной диэлектрической среде. Однако заряженный ОНП окружен гидратным Δ -слоем ($\Delta \approx 1$ нм, $\epsilon_1 \approx 3$) с касательной ориентацией вектора поляризации диполей молекул воды [3], что объясняется экономией энергии водородных связей [4]. За пределами Δ -слоя диэлектрическая проницаемость воды возвращается к обычному для воды значению $\epsilon_2 \approx 80$ (рис. 1). Соответственно, электростатическое давление на поверхности ОНП изменяется до величины $P(r_0)$.

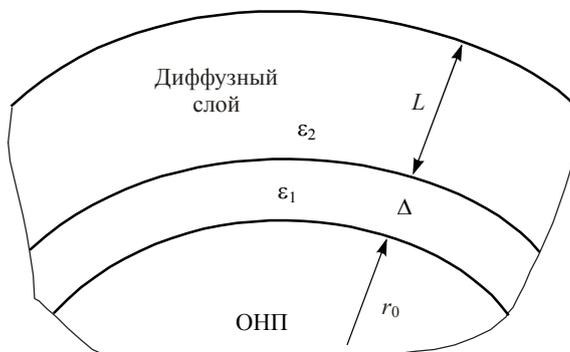


Рис. 1. Структура оболочки объемного нанопузыря

Поэтому решаемая задача состоит в определении давления $P(r_0)$ с учетом влияния Δ -слоя ОНП. Это давление противодействует поверхностному натяжению и стабилизирует ОНП. Затем предполагается определить изменение заряда стабильного ОНП.

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 2

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 17.02.2025. Выпуск в свет 25.02.2025. Заказ № 6219.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 11.86. Уч.-изд. л. 13.28. 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

