

ISSN 0021–3411

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ**

# **ФИЗИКА**

**ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ**

**ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

**ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА**

**ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ**

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

**5·2023**

**ИЗДАНИЕ  
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

---

Том 66

Май, 2023

№ 5 (786)

---

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1957 г.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

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



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

### Учредитель:

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

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

### EDITORIAL BOARD

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

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

### КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02

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

E-mail: [physics@mail.tsu.ru](mailto:physics@mail.tsu.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Шаншо А., Дорофеев И.О., Дунаевский Г.Е., Емельянов Е.В. К вопросу о резонаторных измерениях поляризуемости малых компонентов композиционных материалов.....	5
Свешников И.В. Электронно-тепловые механизмы передачи энергии центрам свечения в процессе электролюминесценции ионных кристаллов.....	14
Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Усиливающая квадрупольная среда.....	22
Бердыбаева Ш.Т., Тельминов Е.Н., Солодова Т.А., Дегтяренко К.М. Фотовозбуждаемый сенсор на определение аммиака и хлористого водорода.....	29

## ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

Зарифзода А.К. О процессах распространения звуковых волн в магнитных жидкостях.....	34
---	----

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Басалаев Ю.М., Маринова С.А., Коноплин Н.А., Басалаева О.Г. Первопринципное изучение антихалькопирита $Be_2SeTe$ .....	45
Есбергенов Д.М. Взаимодействие примесей Zn и Ni с технологическими примесями в кремнии.....	53
Коляда Д.В., Фирсов Д.Д., Тимофеев В.А., Машанов В.И., Скворцов И.В., Есин М.Ю., Петрушков М.О., Комков О.С. Влияние различных методов отжига на инфракрасную фотолюминесценцию наногетероструктур $GeSiSn/Ge/Si$ с множественными квантовыми ямами.....	60

## ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Баньшикова М.А., Тамаров В.А. Исследование нелинейности обратных задач орбитальной динамики далеких спутников Юпитера.....	67
--	----

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Черкашина Н.И. Ослабление интенсивности $\gamma$ -излучения при прохождении через высоконаполненный полиимидный композит.....	77
Соловьева Ю.В., Соловьев А.Н., Старенченко В.А., Пилюгин В.П., Толмачев Т.П., Никоненко Е.Л. Эволюция субструктуры и статистика фрагментов монокристаллического никеля в условиях мегапластической деформации.....	85
Червинская А.С., Доценко О.А., Беломытцева Е.С., Качусова А.О. Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов с углеродными нанотрубками.....	96
Аникеев С.Г., Мамазакиров О., Ходоренко В.Н., Артюхова Н.В., Кафтаранова М.И., Шабалина А.В., Пахолкина С., Кокорев О.В., Гюнтер В.Э. Исследование структуры поверхности и фазовых превращений в биосовместимых пористых сплавах на основе никелида титана, полученных методом диффузионного спекания.....	103
Николаев Е.В., Лысенко Е.Н., Бобуёк С., Суржиков А.П. Исследование магнитных свойств никель-цинковых ферритов терромагнитометрическим методом.....	112

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Кожевников В.Ю., Козырев А.В. О применимости «плазменного приближения» к кинетическому рассмотрению распада вакуумной плазмы в свободном пространстве.....	120
Гусейнов Т.Х., Расулов Э.А. Импеданс-спектроскопия неоднородной неоновой плазмы.....	127

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Осипов Д.А., Смирнов И.В., Гриняев К.В., Дитенберг И.А. Низкотемпературный синтез интерметаллидных фаз в наноструктурированном механокомпозите системы $3Ni-Al$ .....	135
Дитенберг И.А., Осипов Д.А., Смирнов И.В., Гриняев К.В., Толстихин В.И. Фазовый состав и микротвердость эквивалентной порошковой смеси $W-Ta-Mo-Nb-Zr-Cr-Ti$ после механической активации и высокотемпературного отжига.....	138
Николаев А.Г., Андронов А.А., Казаков А.В., Юшков Ю.Г. Рентгенофазовый анализ с использованием синхротронного излучения покрытий бора, нанесенных методом электронно-лучевого испарения.....	141

## CONTENTS

## OPTICS AND SPECTROSCOPY

<b>Shansho A., Dorofeev I.O., Dunaevskii G.E., Emelyanov E.V.</b> On the subject of resonator measurements of polarizability of small components of composite materials .....	5
<b>Sveshnikov I.V.</b> Electron-thermal mechanisms of energy transfer to glow centers in the process of electroluminescence of ion crystals .....	14
<b>Averbukh B.B., Averbukh I.B.</b> Amplifying quadrupole medium .....	22
<b>Berdybaeva Sh.T., Tel'minov E.N., Solodova T.A., Degtyarenko K.M.</b> Photo-excitabile sensor for the determination of ammonia and hydrogen chloride vapors .....	29

## THERMAL PHYSICS AND HYDRODYNAMICS

<b>Zarifzoda A.Q.</b> On the propagation of sound waves in magnetic liquids .....	34
---	----

## PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

<b>Basalaev Yu.M., Marinova S.A., Konoplin N.A., Basalaeva O.G.</b> Ab initio study of antichalcopyrite $\text{Be}_2\text{SeTe}$ .....	45
<b>Esbergenov D.M.</b> Interaction of Zn and Ni impurities with technological impurities in silicon .....	53
<b>Kolyada D.V., Firsov D.D., Timofeev V.A., Mashanov V.I., Skvortsov I.V., Yesin M.Yu., Petrushkov M.O., Komkov O.S.</b> Influence of different annealing types on the infrared photoluminescence of GeSiSn/Ge/Si multiple quantum well nanostructures .....	60

## ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS AND FIELD THEORY

<b>Banshchikova M.A., Tamarov V.A.</b> Investigation of nonlinearity of orbital dynamics inverse problems for Jupiter's outer satellites .....	67
--	----

## CONDENSED-STATE PHYSICS

<b>Cherkashina N.I.</b> Weakening of $\gamma$ -radiation intensity when passing through a highly filled polyimide composite .....	77
<b>Solov'eva Y.V., Solov'ev A.N., Starenchenko V.A., Pilyugin V.P., Tolmachev T.P., Nikonenko E.L.</b> Substructure evolution and fragments statistics of single-crystalline nickel under severe plastic deformation .....	85
<b>Chervinskaya A.S., Dotsenko O.A., Belomytseva E.S., Kachusova A.O.</b> Effect of ultrasonic treatment on the permittivity of composites with carbon nanotubes .....	96
<b>Anikeev S.G., Mamazakirov O., Khodorenko V.N., Artyukhova N.V., Kaftaranova M.I., Shabalina A.V., Pakholkina S., Kokorev O.V., Gunther V.E.</b> Investigation of the surface structure and phase transformations in biocompatible porous alloys based on TiNi obtained by the method of diffusion sintering .....	103
<b>Nikolaev E.V., Lysenko E.N., Bobuyok S., Surzhikov A.P.</b> Investigation of the magnetic properties of nickel-zinc ferrites by the thermomagnetometric method .....	112

## PLASMA PHYSICS

<b>Kozhevnikov V.Yu., Kozyrev A.V.</b> On applicability of «plasma approximation» to kinetic description of vacuum plasma decay in free space .....	120
<b>Guseinov T.Kh., Rasulov E.A.</b> Impedance-spectroscopy of inhomogeneous neon plasma .....	127

## BRIEF COMMUNICATIONS

<b>Osipov D.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., Ditenberg I.A.</b> Low-temperature synthesis of intermetallic phases in nanostructured mechanocomposite of the 3Ni–Al system .....	135
<b>Ditenberg I.A., Osipov D.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., Tolstikhin V.I.</b> Phase composition and microhardness of W–Ta–Mo–Nb–Zr–Cr–Ti equiatomic powder mixture after mechanical activation and high-temperature annealing .....	138
<b>Nikolaev A.G., Andronov A.A., Kazakov A.V., Yushkov Yu.G.</b> Synchrotron radiation-based X-ray phase analysis of boron coatings deposited by electron-beam evaporation .....	141

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.317.3, 4

DOI: 10.17223/00213411/66/5/1

**К вопросу о резонаторных измерениях поляризуемости малых компонентов композиционных материалов**А. Шаншо<sup>1</sup>, И.О. Дорофеев<sup>1</sup>, Г.Е. Дунаевский<sup>1</sup>, Е.В. Емельянов<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На примере размещения в открытом квазиоптическом резонаторе малого, по сравнению с длиной волны, диэлектрического эллипсоида с произвольным соотношением размеров осей показана возможность определения поляризуемости частиц, применяемых в качестве наполнителей композитов. Показано, что с уменьшением размеров исследуемых малых объектов растут требования к разрешающей способности схемы измерения частотной перестройки резонатора. Для получения достаточно высокого частотного разрешения предложена схема КВЧ-спектрометра, использующего лампу обратной волны, стабилизированную с помощью субгармонического смесителя и перестраиваемую в режиме синтезатора частот.

**Ключевые слова:** поляризуемость, малый эллипсоид, лампа обратной волны, квазиоптический резонатор, стабильность.

**Введение**

Создание композиционных материалов с заданными в определенном диапазоне частот электромагнитными характеристиками во многих случаях предполагает применение малых компонентов [1], радиоволновые параметры которых в данном диапазоне полагаются известными. Соответственно, актуальна разработка методики измерений электрофизических параметров данных компонентов непосредственно на частотах дальнейшего их использования.

В субтерагерцовом, терагерцовом диапазонах частот для измерений радиоволновых параметров малых образцов целесообразно применение открытых квазиоптических резонаторов [2–5], обладающих высокой добротностью и обеспечивающих свободный доступ к рабочему пространству.

Конфигурация вносимых в композит малых элементов может быть различной (плоской, сфероидальной, нитевидно вытянутой), в связи с чем целесообразно рассмотреть особенности включения в открытый резонатор (ОР) малого образца эллипсоидальной формы с произвольным соотношением размеров осей. При этом все эти размеры будем предполагать малыми по сравнению с длинами волн во всем предполагаемом диапазоне использования композита. Включение столь малых образцов в открытый резонатор приводит к незначительным и трудно измеряемым возмущениям его резонансных частот и добротностей, соответственно, важным фактором, ограничивающим возможности таких измерений, является разрешающая способность применяемых измерительных схем. Здесь становятся существенными сложности, связанные с недостаточно высоким частотным разрешением спектрометров субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот, где применение открытых резонаторов наиболее перспективно.

В данной работе оценивается величина частотного сдвига, создаваемого малым диэлектрическим эллипсоидом при внесении его в ОР, а также рассматривается возможность обеспечения достаточной стабильности лампы обратной волны (ЛОВ) для фиксации малых изменений резонансных частот ОР.

**Малый эллипсоид в открытом резонаторе**

В основу описания включения в ОР малого диэлектрического эллипсоида может быть положена теория возбуждения резонатора заданными токами [2, 6].

Рассмотрим симметричный ОР, образованный вогнутыми сферическими зеркалами с радиусами вогнутости  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , расположенными на расстоянии  $L$  одно от другого. Согласно [2], для возбуждения в таком резонаторе устойчивых добротных колебаний должно выполняться условие

$$0 < (1 - L/\rho)^2 < 1.$$

## Электронно-тепловые механизмы передачи энергии центрам свечения в процессе электролюминесценции ионных кристаллов

И.В. Свешников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия*

Исследованы электронные возбуждения в ионных кристаллах в условиях сильных электрических полей в процессе электролюминесценции щелочно-галогидных кристаллов (ЭЛ ЩГК). На основе измерений вольт-амперных, яркостных, характеристик ЭЛ ЩГК, следования процессов токопереноса и механизмов миграции энергии возбуждения к центрам свечения в ЩГК в условиях сильных электрических полей до  $10^8$  В/м, зависимостей квантового выхода ЭЛ от концентрации активатора, оценки параметров возбуждения и ионизации в широкой температурной области сделаны предположения о возможности проявления стадии автолокализованного экситона (АЛЭ) в процессе миграции энергии возбуждения к центрам свечения в области низких температур. В ходе анализа результатов измерений характеристик ЭЛ ЩГК в широкой температурной области (от  $-180$  до  $+100$  °С) с использованием неактивированных и активированных двухвалентной примесью оснований с помощью различных экспериментальных методик была исследована возможность передачи энергии возбуждения центрам свечения в условиях сильного электрического поля высокоэнергетическими электронными возбуждениями – экситонами. Экспериментально подтверждена возможность участия АЛЭ при передаче энергии возбуждения центрам свечения в процессе прыжковой диффузии.

**Ключевые слова:** *плазма, методика, давление, кристаллы.*

### Введение

Как известно [1, 2], в условиях сильных электрических полей до  $10^8$  В/м экситоны в ионных кристаллах возбуждаются одним из следующих механизмов: распад высокоэнергетических плазмонов, прямое ударное возбуждение ионов кристалла электронами, рекомбинация электронов с дырками (релаксированными или нерелаксированными), прямое оптическое создание экситонов.

Рассмотрим эти механизмы применительно к щелочно-галогидным кристаллам и возможности передачи энергии центрам свечения экситонами в условиях сильного электрического поля. Как известно [1–4], свечение автолокализованных экситонов регистрируется во всех кристаллах в условиях правильно поставленного эксперимента.

Как известно [5], плазмоны являются нестабильными электронными возбуждениями в ионных кристаллах, имеющими короткое время жизни, по истечении которого распадаются на электронно-дырочные пары и экситоны. При исследовании пространственно-временных характеристик импульсного разряда с катода, возникающего в процессе токопереноса в тонких слоях твердых диэлектриков с толщинами от 1 до 10 мкм, как было выяснено ранее, происходят процессы деградации образцов и свечения под воздействием электрического поля с напряженностью до  $10^5$  В/м [6], в процессе которых есть вероятность создания экситона электронным ударом.

Вероятность рекомбинации свободных электронов с дырками, уже локализованными на дефектах кристаллической решетки, появляется лишь при понижении температур до азотных, что, следовательно, может подтверждать существование стадии автолокализованного экситона (АЛЭ) [3]. Возникающее при этом свечение имеет тот же спектральный состав, что и при прямом фотофизическом возбуждении экситонами. Если в области низких температур экситоны аннигилируют, главным образом, с появлением излучения [1, 2], то при повышении температуры кристалла вероятность излучательной аннигиляции АЛЭ резко падает, квантовый выход свечения АЛЭ уменьшается, что, очевидно, связано либо с распадом возбуждения на фононный пакет, либо с безызлучательной аннигиляцией свободных экситонов на структурных дефектах кристаллической решетки. Вероятность второго механизма растет с ростом температуры по причине тепловой ионизации экситонов, что ограничивает температурную область существования экситонов в щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК).

В условиях реального эксперимента, на наш взгляд, энергия создания экситона может быть больше энергии создания электронно-дырочной пары [2], что будет приводить к автоионизации экситонов [4].

Очевидно, генерируемые в условиях электрического поля экситоны при своем движении по кристаллу должны вступать во взаимодействие с различными дефектами кристаллической решетки.

## Усиливающая квадрупольная среда\*

Б.Б. Авербух<sup>1</sup>, И.Б. Авербух<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Рассмотрено распространение плоской электромагнитной волны через метаматериал с чисто квадрупольным откликом на внешнее поле. Метаматериал состоит из линейных или плоских квадруполей. Получены выражения для полей, рассеянных средой вперед и назад. В случае метаматериала конечной толщины из линейных квадруполей введен показатель преломления и проанализированы различные ситуации на границе раздела. В случае плоских квадруполей рассмотрено преобразование излучения плоской метаповерхностью толщиной в один квадруполь.

**Ключевые слова:** метаматериал, электрический и магнитный диполи, электрический линейный и плоский квадруполь, оптическое магнитное зеркало, невидимость, двусторонняя поверхность, обратная волна.

### Введение

В последнее время активно исследуются метаматериалы с такими включениями, при которых существенную роль играют не только электрический и магнитный дипольные отклики на внешнее поле, но и электрический квадрупольный [1–3]. Пространственно-частотное распределение квадрупольного излучения отличается от пространственно-частотного распределения дипольного. Это открывает новые возможности с точки зрения различных приложений. В работах [4, 5] исследовалось рассеяние излучения квадрупольными метаматериалами с включениями в виде дисковых метадимеров, в которых на определенной частоте нет электрического дипольного отклика, а есть дипольный магнитный и электрический квадрупольный отклики. Со временем будут созданы и материалы только с квадрупольным откликом на внешнее поле – чисто квадрупольные среды. Работ по анализу распространения излучения в таких средах в доступной нам литературе нет.

Свойствами квадрупольной среды возможно обладают некоторые естественные материалы (например, молекулярный кристалл твердого  $\text{CO}_2$  (сухой лед)), образованные из линейных неполярных молекул типа  $\text{CO}_2$ , которые можно моделировать линейными электрическими квадрупольями.

В первой части данной работы рассматривается распространение монохроматической электромагнитной волны в метаматериале из линейных электрических квадруполей с только квадрупольным откликом на внешнее поле. Во второй части работы рассматривается среда из пар параллельных проволок [3, 6, 7]. При определенных условиях в такой среде возможен только квадрупольный отклик на внешнее поле.

### Метаматериалы из линейных электрических квадруполей

Пусть среда представляет собой диэлектрик, состоящий из периодически расположенных плоскопараллельных  $q$  монослоев (т.е. слоев толщиной в один квадруполь) (рис. 1), состоящих из точечных электрических линейных квадруполей.

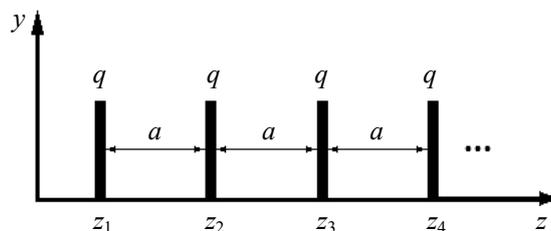


Рис. 1. Схема расположения  $q$  монослоев в среде из электрических квадруполей

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, дополнительное соглашение от 1 июня 2021 г. № 075-02-2021-1389.

**Фотовозбуждаемый сенсор на определение аммиака и хлористого водорода\***Ш.Т. Бердыбаева<sup>1</sup>, Е.Н. Тельминов<sup>1</sup>, Т.А. Солодова<sup>1</sup>, К.М. Дегтяренко<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены генерационные характеристики тонкопленочных лазерных сенсоров при воздействии паров аммиака и хлористого водорода. Получено, что после 20 с воздействия аммиака (10% смеси с аргоном) наступает срыв генерации в лазерном сенсоре. При взаимодействии с хлористым водородом в течение 30 с интенсивность генерации сенсора на основе полиметилметакрилата, допированного Нильским красным, снижается на 67%. Показана перспективность использования пленок полиметилметакрилата, допированного Нильским красным, в качестве чувствительного слоя сенсора на аммиак и хлористый водород.

**Ключевые слова:** лазерная генерация, лазерный сенсор, Нильский красный, аммиак, хлористый водород.

**Введение**

В настоящее время возрастает потребность промышленных предприятий в универсальных средствах, обеспечивающих экологическую и технологическую безопасность производства с целью защиты окружающей среды и предотвращения техногенных катастроф. В помещениях, связанных с производством или использованием аммиака и хлористого водорода, требуется автоматический контроль содержания их в воздухе.

Аммиак ( $\text{NH}_3$ ) является высокотоксичным, раздражающим, взрыво- и пожароопасным веществом с резким запахом. Органами государственного надзора издан ряд нормативных документов, требующих обеспечения безопасности аммиачных производств [1]. Данным положением регламентируются два предела допустимой концентрации (ПДК) аммиака в воздухе рабочей зоны 1 ПДК = 20 мг/м<sup>3</sup> и 3 ПДК = 60 мг/м<sup>3</sup>. Соляная кислота (хлористый водород, HCl) особо токсична, числится в списке сильнодействующих ядовитых веществ, относится ко второму классу опасности (ПДК = 0.2 мг/м<sup>3</sup>).

Для контроля их концентрации используются различного рода датчики. Из большого разнообразия датчиков значительное внимание уделяется применению оптических молекулярных химических сенсоров, которые работают в режиме люминесценции и обеспечивают достаточную чувствительность. Последние работы по созданию сенсоров, работающих на тушении флуоресценции, показывают, что переход от люминесцентного режима в пороговый режим вынужденного излучения позволяет повысить чувствительность устройства [2]. Для такого перехода необходимо создать условия волноводного распространения возникающего спонтанного усиленного излучения, учитывая соотношения коэффициентов преломления слоев волновода. А именно, показатель преломления активного слоя должен быть больше показателя преломления подложки, т.е.  $n_{\text{ср}} > n_{\text{подложки}}$  (1) и больше окружающей воздуха  $n_{\text{ср}} > n_{\text{воздуха}}$  (2). В результате благодаря явлению полного внутреннего отражения (ПВО) реализуется режим бегущей волны.

В режиме пороговой генерации интенсивность излучения тонкопленочного элемента зависит от изменения химического состава окружающей его среды и при наличии небольшого количества вещества, вызывающего тушение люминесценции, может привести к полному срыву лазерной генерации. В режиме лазерной генерации в несколько раз уменьшается время отклика на присутствие аналита, так в работе [2] время отклика уменьшилось в 4 раза.

В настоящей работе исследованы генерационные характеристики созданных фотовозбуждаемых волноводных органических лазерных сенсоров на основе полиметилметакрилата (ПММА), допированного красителем Нильский красный, в присутствии  $\text{NH}_3$  и HCl.

**Объекты исследования**

В работе в качестве лазерно-активного соединения использован краситель Нильский красный (НК), сольватохромные свойства которого представлены в [3], а в работах [4, 5] показано его применение в качестве люминесцентного сенсора.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90113.

**ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА**

УДК 537.84:534.22

DOI: 10.17223/00213411/66/5/5

**О процессах распространения звуковых волн  
в магнитных жидкостях**А.К. Зарифзода<sup>1</sup><sup>1</sup> *Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Республика Таджикистан*

Для модели двухкомпонентной магнитной жидкости с замороженной намагниченностью с использованием уравнения движения и микроскопического выражения тензора напряжения, выведенных на основе метода неравновесной статистической теории, получены дисперсионные уравнения, описывающие сдвиговые моды, а также быстрые, медленные и альфвеновские магнитогидродинамические волны в магнитных жидкостях. Проведены численные расчеты зависимости скорости быстрой звуковой волны от частоты и величины внешнего магнитного поля при различных значениях концентрации, а также рассмотрена анизотропия звука в магнитной жидкости. Показано, что проведенные численные расчеты находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными и теоретическими результатами.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитозвуковые волны, дисперсия скорости, дисперсия коэффициента поглощения.

**Введение**

Исследование процессов распространения и поглощения акустических волн в жидкостях позволяет определить физические свойства исследуемых жидкостей и использовать их в практических целях. В настоящее время очень хорошо развиты акустические методы исследования и их результаты нашли широкие приложения в различных областях физики. Большое количество публикаций по исследованию наноструктур и свойств магнитных жидкостей основаны на методе акустического анализа [1–3].

Магнитные жидкости, проявляя высокую чувствительность к воздействию внешнего магнитного поля, под его действием резко изменяют свои вязкоупругие, термические и акустические свойства. Успешное применение магнитных жидкостей в технике зависит от уровня имеющейся информации об их поведении в присутствии внешнего магнитного поля. Одним из предпочтительных методов исследования магнитных жидкостей является метод акустических исследований, который позволяет получать информацию о структуре магнитной жидкости и отслеживать релаксационные процессы, происходящие в ней.

В первоначальных работах [4–7] экспериментальные исследования зависимости скорости распространения и поглощения акустических волн от термодинамических параметров системы в магнитных жидкостях были проведены в отсутствие внешнего магнитного поля. Также в теоретических моделях [8–10], где магнитная жидкость рассматривалась как идеальная дисперсная система из твердых магнитных частиц, стабилизированных поверхностно-активным слоем в жидкости-носителе, при распространении и поглощении акустических волн не учитывалось влияние внешнего магнитного поля. Однако в присутствии внешнего магнитного поля в теории распространения волн в магнитных жидкостях необходимо учитывать зависимости акустических параметров от напряженности магнитного поля, что в значительной мере усложняет теоретические исследования.

В экспериментальных работах [11–13] было показано, что присутствие внешнего магнитного поля приводит к увеличению скорости распространения и поглощения акустических волн в магнитных жидкостях.

Достаточно полную информацию об экспериментальных и теоретических исследованиях по распространению и поглощению акустических волн в магнитных жидкостях можно найти в обзорной статье [14]. Также в [15] имеется перечень теоретических и экспериментальных исследований распространения и поглощения звуковых волн в нанодисперсных коллоидных системах.

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 538.9

DOI: 10.17223/00213411/66/5/6

Первопринципное изучение антихалькопирита  $\text{Be}_2\text{SeTe}$ Ю.М. Басалаев<sup>2</sup>, С.А. Маринова<sup>1</sup>, Н.А. Коноплин<sup>1</sup>, О.Г. Басалаева<sup>2</sup><sup>1</sup> *Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия*<sup>2</sup> *Кемеровский государственный медицинский университет, г. Кемерово, Россия*

В рамках теории функционала плотности построена модель гипотетического кристалла  $\text{Be}_2\text{SeTe}$  со структурой, подобной структуре халькопирита, получены равновесные параметры кристаллической решетки  $a = 5.4576 \text{ \AA}$ ,  $c = 10.2701 \text{ \AA}$ ,  $u = 0.2808$ . Вычислены упругие постоянные, модули упругости, коэффициент Пуассона (0.14) и установлено, что кристалл является прочным (микротвердость 19.5 ГПа) прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 3.57 эВ.

**Ключевые слова:** антихалькопирит,  $\text{Be}_2\text{SeTe}$ , константы упругости, халькопирит.

## Введение

Синтез и экспериментальное исследование тройных сплавов  $\text{II-VI}_x\text{-VI}_{1-x}$  на основе бинарных халькогенидов  $\text{II-VI}$  обусловлены их востребованностью в качестве рабочих материалов для оптических приборов и устройств. Чтобы бинарные халькогениды  $\text{II-VI}$  были применимы в люминесцентных и оптоэлектронных системах, они должны иметь одновременно широкую ( $> 2 \text{ эВ}$ ) и прямую запрещенную зону ( $E_g$ ) [1]. Так, например,  $\text{BeSe}$  и  $\text{BeTe}$  соответствуют этим требованиям и представляют интерес как рабочие материалы для оптических устройств видимого диапазона, к тому же устройства на их основе обладают более долгим сроком службы [1–4]. В последнее время наметился интерес к получению тройных соединений, в которых путем изменения химического состава удастся не только подобрать требуемую ширину запрещенной зоны, но и изменить ее основной тип. Двойные халькогениды магния ( $\text{MgSe}$  и  $\text{MgTe}$ ) являются материалами с широкой, но непрямой запрещенной зоной, однако, как показывают исследования [5], этот недостаток можно устранить, получив на их основе тройные соединения  $\text{MgSe}_x\text{Te}_{1-x}$  с прямой запрещенной зоной. Исследование [5] позволило авторам установить возможность использования этих соединений в качестве активных материалов в различных оптоэлектронных и люминесцентных устройствах, работающих в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра.

Интенсивные исследования щелочноземельных халькогенидов  $\text{AX}$  ( $\text{A} = \text{Be, Mg, Ca, Sr, Ba}$ ;  $\text{X} = \text{O, S, Se, Te}$ ) при обычных условиях и под высоким давлением, проведенные в последние несколько десятилетий, показали, что большинство этих соединений кристаллизуется в структуре типа  $\text{NaCl}$ , кроме  $\text{BeX}$  ( $\text{X} = \text{S, Se, Te}$ ), которые кристаллизуются в структуре цинковой обманки (сфалерита), а также  $\text{BeO}$  и  $\text{MgTe}$ , кристаллизующихся в структуре вюрцита. Под высоким давлением в соединениях  $\text{CaX}$ ,  $\text{SrX}$  и  $\text{BaX}$  наблюдается структурный фазовый переход из структуры типа  $\text{NaCl}$  (B1) в структуру типа  $\text{CsCl}$  (B2). Также был установлен структурный фазовый переход в кристаллах  $\text{BeSe}$  и  $\text{BeTe}$  соответственно при давлениях 56.5 и 35.5 ГПа из основной структуры цинковой обманки (B3) в структуру типа  $\text{NiAs}$  (B8) [6]. Аналогичный структурный переход получен для кристалла  $\text{BeS}$  под давлением 49.6 ГПа [7]. Структурная стабильность халькогенидов бериллия ( $\text{BeS, BeSe, BeTe}$ ) была теоретически изучена с помощью псевдопотенциальных расчетов в работах [8–12].

Структура халькопирита является производной от структуры сфалерита, что позволяет предположить возможность образования тройного халькопиритоподобного соединения  $\text{Be}_2\text{SeTe}$  из двух бинарных соединений  $\text{BeSe}$  и  $\text{BeTe}$  со структурой сфалерита. Такое соединение можно представить как твердый раствор  $\text{BeSe}_x\text{Te}_{1-x}$  с концентрацией  $x = 0.5$ , но с упорядоченным расположением атомов  $\text{Se}$  и  $\text{Te}$  в соответствующих подрешетках структуры халькопирита.

Основной целью настоящей работы является моделирование нового кристалла  $\text{Be}_2\text{SeTe}$  в структуре, подобной структуре халькопирита (антихалькопирита), и изучение его свойств методами теории функционала плотности с использованием возможностей кода CRYSTAL [13].

## Взаимодействие примесей Zn и Ni с технологическими примесями в кремнии

Д.М. Есбергенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан

Приведены результаты исследований взаимодействия атомов примесей цинка и никеля в кремнии, легированных последовательно, в различных комбинациях с помощью метода рентгеновской дифракции и ИК-фурье-спектроскопии. Степень кристалличности решетки кремния, легированного примесями Zn, Ni, зависит от технологии введения данных примесей. Было обнаружено, что после введения атомов Zn в Si, предварительно легированный Ni (Si<Ni, Zn>), вместе с уменьшением концентрации атомов оптически-активного кислорода улучшается прозрачность кристалла, в то время как в образцах при обратной комбинации легирования (Si<Zn, Ni>) наблюдается обратный эффект.

**Ключевые слова:** кремний, цинк, никель, диффузия, спектр рентгеновской дифракции, ИК-пропускание.

### Введение

В мире в течение последних десятилетий изучаются поведение большинства дефектов и механизмы их образования, а также одновременно разрабатываются методы по устранению нежелательных дефектов в полупроводниках [1–9]. В настоящее время доступны модели для объяснения множества явлений, таких как: форма профиля легирующей примеси; условия диффузионного легирования; неравновесные эффекты, вызванные химическими реакциями или радиационными повреждениями; снижение электрической активации легирующих примесей за счет образования примесных фаз, кластеров и комплексов с другими примесями [6–8]; наконец, скопление легирующих примесей на границах переходов и поверхностях полупроводниковых материалов. Поведение примеси переходных металлов в Si изучалось давно, свойства и электрофизические параметры изолированных атомов изучены достаточно хорошо [9]. В то же время мало изучены комплексы, создающие атомы нескольких элементов, которые приводят к образованию центров зарождения преципитатов (осадков) [10, 11]. Примеси переходных элементов, создающие глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния, как известно, обладают высокой миграционной способностью и поэтому механизм движения примесных атомов зависит от технологии легирования примеси в основной матрице кристалла. Высокая подвижность указанных примесей приводит к возможности вступать во взаимодействия с другими неконтролируемыми примесями в кремнии с образованием примесных пар.

В связи с этим изучение процессов дефектообразования в кремнии, легированном несколькими примесями атомов переходных элементов, в частности Ni и Zn, под воздействием различных факторов, таких как взаимодействие технологических примесей и неконтролируемых дефектов в кремнии [12], влияние термических и радиационных дефектов на формирование дефектной структуры кремния с примесями Ni и Zn, является одной из важных задач. Все это требует поиска новых теоретических и практических подходов, чтобы на атомарном уровне выявить механизмы образования и перестройки структурных дефектных комплексов для целенаправленного управления свойствами кремния, легированного различными примесями.

Поэтому цель данной работы – изучение дефектной структуры и взаимодействия с технологическими примесями в присутствии атомов быстро диффундирующих переходных элементов Ni и Zn в решетке кремния с помощью ИК-фурье-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

### Материал и методика

Для экспериментов использовались образцы кремния *n*-типа, выращенные методом Чохральского, с удельным сопротивлением 100 Ом·см. В этих образцах концентрация фосфора составляла  $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, концентрация кислорода была равной  $\sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. При диффузии примесных атомов на очищенную поверхность образцов в вакууме напылялись металлический Zn и Ni с чистотой 99.99%. Легирование образцов кремния примесями осуществлялось термодиффузионным спосо-

## Влияние различных методов отжига на инфракрасную фотолюминесценцию наногетероструктур GeSiSn/Ge/Si с множественными квантовыми ямами\*

Д.В. Коляда<sup>1</sup>, Д.Д. Фирсов<sup>1</sup>, В.А. Тимофеев<sup>2</sup>, В.И. Машанов<sup>2</sup>,  
И.В. Скворцов<sup>2</sup>, М.Ю. Есин<sup>2</sup>, М.О. Петрушков<sup>2</sup>, О.С. Комков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследованы наногетероструктуры с множественными квантовыми ямами  $\text{Ge}_{0.84}\text{Si}_{0.076}\text{Sn}_{0.084}/\text{Ge}/\text{Si}$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках, включая структуры с Ge квантовыми точками. Образцы были подвергнуты двум методам отжига: продолжительному – в течение 10 мин в кварцевой печи в атмосфере аргона, и быстрому – в течение 1 мин галогеновой лампой в аналогичной атмосфере. Показано, что для структур с множественными квантовыми ямами  $\text{Ge}_{0.84}\text{Si}_{0.076}\text{Sn}_{0.084}/\text{Ge}/\text{Si}$  быстрый отжиг галогеновой лампой позволяет заметно уменьшить сдвиг положения пика фотолюминесценции по сравнению с медленным высокотемпературным отжигом образцов, что свидетельствует о сниженном влиянии диффузии олова из узкозонного слоя квантовой ямы. Тот же эффект наблюдался при отжиге структур с квантовыми точками германия, что позволило предположить, что при быстром отжиге галогеновой лампой параметры квантовых точек, расположенных над слоями  $\text{Ge}_{0.84}\text{Si}_{0.076}\text{Sn}_{0.084}$ , не успевают измениться столь существенно, как при продолжительном отжиге в кварцевой печи.

**Ключевые слова:** молекулярно-лучевая эпитаксия, твердый раствор, наногетероструктуры, множественные квантовые ямы, отжиг, фотолюминесценция.

### Введение

В последнее время наногетероструктуры на основе кремния привлекают все большее внимание исследователей в связи с их потенциальным применением в создании новых полупроводниковых устройств для работы в среднем инфракрасном диапазоне [1, 2]. Особое внимание уделяется материалам на основе элементов IV группы (Ge, Si, Sn), перспективных в том числе с точки зрения создания всего комплекса фотонных устройств, размещенных на едином кремниевом кристалле, включая монолитную интеграцию с существующими Si мультиплексорами [3]. Широкое распространение получил материал  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ , являющийся перспективным для создания излучателей и фотоприемников в среднем ИК-диапазоне благодаря своей прямозонной структуре при содержании олова 6.5–10% [4, 5]. Однако высокое содержание олова приводит к его сегрегации, что усложняет контролируемый рост подобных структур и увеличивает количество дефектов [6]. Большое рассогласование постоянных решеток также требует подбора оптимального соотношения между Ge и Sn для получения псевдоморфных слоев на Si-подложках. Несмотря на эти недостатки, на основе  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  уже были созданы различные устройства, включая фотоприемники, светоизлучающие диоды, лазеры, накачиваемые оптически [7] и электрически [8]. Несмотря на очевидные успехи, продолжается поиск альтернатив  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ , и таковой может быть применение твердого раствора  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ , близкого по постоянной решетки к Si. Добавление олова в матрицу GeSi позволяет проводить зонный инжиниринг исходного материала [9]. В свою очередь, варьируя содержание олова в слое твердого трехкомпонентного раствора  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ , можно регулировать ширину запрещенной зоны материала и изменять его рабочую длину волны от ближнего до среднего инфракрасного диапазона [10–12].

В настоящее время удается получать излучающие и фотоприемные структуры на основе  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ , выращиваемые на буферном слое германия большой толщины [13, 14]. Изменяя состав  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ , возможно выращивать бездислокационные напряженные слои на кремнии, в то время как слои, выращенные на Ge, имеют большое количество дислокаций, заметно ухудшающих оптические свойства получаемых структур. Создавать светоизлучающие структуры на основе тройного раствора  $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$  целесообразно посредством формирования квантовых ям из-за малой критической толщины псевдоморфного роста [15, 16]. Ранее нами был реализован метод создания излучающих структур на кремниевой подложке, заключающийся в формировании множест-

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10092).

## ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК 523.45-87, 52-17

DOI: 10.17223/00213411/66/5/9

### Исследование нелинейности обратных задач орбитальной динамики далеких спутников Юпитера\*

М.А. Баньщикова<sup>1</sup>, В.А. Тамаров<sup>1</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследована нелинейность обратных задач орбитальной динамики внешних спутников Юпитера, открытых с 1999 по 2018 г. С этой целью были использованы наблюдения из базы данных естественных спутников NSDB (Natural Satellites Data Base) по состоянию на 11.03.2021 г. Для каждого объекта нелинейность оценивалась в двух параметрических пространствах – декартовом и кеплеровом. Определены оптимальные начальные эпохи, обеспечивающие наименьшую нелинейность в рассматриваемых параметрических пространствах. Показано, какое из параметрических пространств вместе с оптимальной начальной эпохой является более предпочтительным для достижения наименьшей нелинейности в каждом конкретном случае.

**Ключевые слова:** спутники Юпитера, нелинейность, начальная эпоха.

#### Введение

В данной работе были рассмотрены внешние спутники Юпитера, открытые с 1999 по 2018 г. [1]. Их количество составляет 62 объекта, они имеют нерегулярные орбиты (с большими эксцентриситетами и наклонениями) и подвержены сильным солнечным возмущениям ввиду существенной удаленности от Юпитера. Период обращения всех этих спутников вокруг Юпитера составляет примерно два года, а большая полуось  $\sim 0.15$  астрономических единиц (рис. 1). Несмотря на то, что со времени открытия некоторых из них прошло уже почти два десятка лет, все они имеют скудный состав наблюдений и большие (до 13 лет) временные промежутки, в которых наблюдения отсутствуют полностью (см. рис. 2). Это обстоятельство приводит к значительной орбитальной неопределенности в движении указанных объектов.

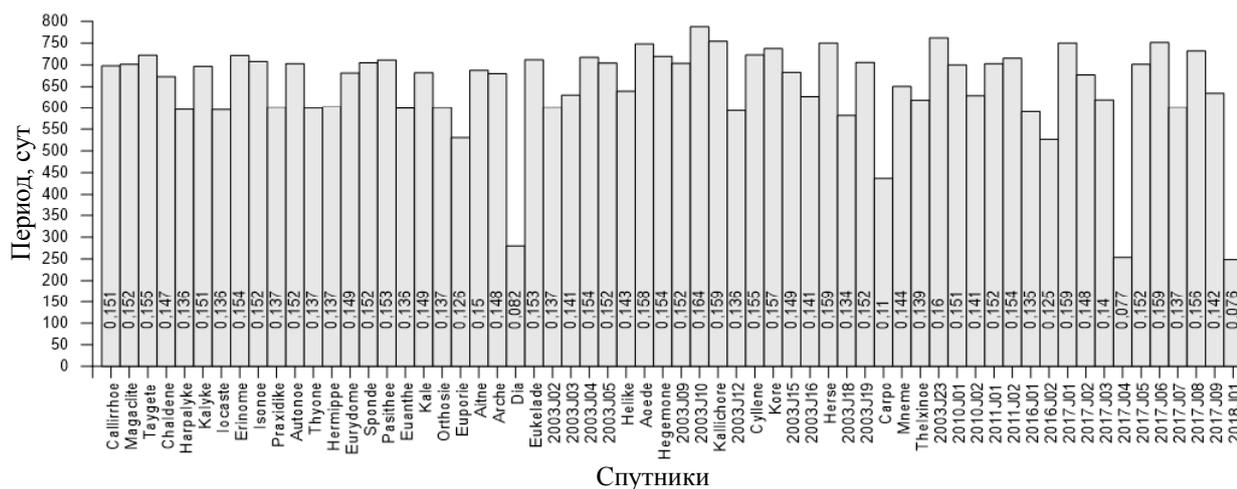


Рис. 1. Орбитальные периоды внешних спутников Юпитера, открытых с 1999 по 2018 г. Цифры на каждом столбике гистограммы означают значения их больших полуосей в астрономических единицах

Обычно для исследования орбитальной неопределенности применяют стохастические методы с использованием ковариационных матриц. Ковариационная матрица несет в себе информацию о

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0049).

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 53.096

DOI: 10.17223/00213411/66/5/10

**Ослабление интенсивности  $\gamma$ -излучения  
при прохождении через высоконаполненный полиимидный композит\***Н.И. Черкашина<sup>1</sup><sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Представлены данные по изучению полиимида и полиимидного композита с оксидом висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Содержание наполнителя в композите варьировалось до 80 мас.% с шагом в 10%. Изучены такие характеристики, как плотность и прочность при трехточечном изгибе композитов с различным содержанием наполнителя. По данным физико-механических характеристик установлено, что оптимальное содержание наполнителя 55–60 мас.%. При таком содержании наполнителя прочность снижается всего на 5,2% от прочности чистого полиимида. Исследования по ослаблению интенсивности  $\gamma$ -излучения проводили экспериментально; использовали образец чистого полиимида без наполнителя и композит оптимального состава, содержащий 40 мас.% полиимида и 60 мас.%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Были измерены дифференциальные и интегральные энергетические распределения плотностей потоков  $\gamma$ -квантов падающего излучения от радиоизотопных источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  без защиты и за экраном из полимерного композита. На их основе были получены соответствующие распределения мощности эффективной эквивалентной дозы (мкЗв/ч) и мощности поглощенной дозы (мкГр/ч) для  $\gamma$ -квантов. Введение  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в количестве 60 мас.% в 3,22 раза повышает кратность ослабления при  $E = 0.662$  МэВ и в 1,62 раза при  $E = 1.252$  МэВ. Кроме того, введение  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в 3 раза повышает линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения при  $E = 0.662$  МэВ и в 2,14 раза при  $E = 1.252$  МэВ.

**Ключевые слова:** оксид висмута, полиимидный композит,  $\gamma$ -излучение, линейный коэффициент ослабления, фактор накопления, радиационная защита.

**Введение**

В настоящее время ионизирующее излучение используют во многих отраслях промышленности: в атомной, медицинской, пищевой и др. [1, 2]. Однако использование ионизирующего излучения требует соблюдения определенных мер безопасности. Для защиты работников часто используют различные радиационно-защитные экраны, которые в значительной мере ослабляют интенсивность ионизирующего излучения. Выбор экранирующего материала в первую очередь обусловлен типом излучения. Известно, что для защиты от нейтронного излучения необходимо использовать водородсодержащие материалы, например, гидриды металлов [3–5]. Барьерная защита из водорода обладает наилучшими защитными свойствами от нейтронов, отнесенными к единице массы.

Широкое распространение для защиты от  $\gamma$ -излучения получили изделия из тяжелых металлов, в частности свинца [6]. Радиационно-защитные экраны из металлов достаточно тяжелые и громоздкие, кроме того, свинец токсичен для здоровья человека и окружающей среды. Поэтому в настоящее время особое внимание уделяется разработке новых материалов для радиационной защиты, которые могут быть альтернативой тяжелым металлам.

Одним из способов уменьшения веса защитного экрана при одинаковом уровне защиты от радиации является использование полимерных композиционных материалов [7–9]. В таких материалах полимер является связующим (матрицей), а в качестве наполнителя используют металлы и оксиды тяжелых металлов, которые значительно ослабляют интенсивность рентгеновских и  $\gamma$ -лучей. Благодаря высоким физико-механическим характеристикам полимерные композиты можно использовать в качестве конструкционных материалов [10, 11].

В работе [12] показано, что добавление вольфрама в полимерную матрицу существенно повышает коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения. В [13] изучалось влияние содержания до 50 мас.% оксида вольфрама (VI) на радиационно-защитные свойства композитов на основе полигидроксипропилметакрилата, которые получали с использованием «метода радикальной полимеризации». Бы-

\* Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

## Эволюция субструктуры и статистика фрагментов монокристаллического никеля в условиях мегапластической деформации\*

Ю.В. Соловьева<sup>1</sup>, А.Н. Соловьев<sup>1</sup>, В.А. Старенченко<sup>1</sup>,  
В.П. Пилюгин<sup>2</sup>, Т.П. Толмачев<sup>2</sup>, Е.Л. Никоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Приведены экспериментальные данные о развитии процессов деформационной фрагментации монокристаллов чистого Ni в условиях мегапластической деформации. Деформация монокристаллов проводилась методом одноосного квазистатического сжатия и кручением под высоким давлением в наковальнях Бриджмена. Получены панорамные электронно-микроскопические картины фрагментированной субструктуры. Проведен статистический анализ, в ходе которого получены выборочные статистики размеров фрагментов, выполнена проверка статистической гипотезы о виде закона распределения размеров фрагментов, проведен анализ самоподобия распределений. Анализ изменения основных статистических характеристик (мода, среднее, стандартное отклонение и др.) позволяет сделать вывод о развитии процессов динамической рекристаллизации в интервале деформаций  $180^\circ - 1$  об. Показано, что при уровне значимости 0.05 распределения размеров фрагментов соответствуют двухпараметрическим логарифмически нормальным распределениям. Оценка коэффициента вариации и относительного размаха выборок показала, что по мере развития деформации монокристаллов чистого Ni наблюдается устойчивая тенденция к формированию высокооднородной структуры. Получено субмикроструктурное состояние материала, имеющего зерна равноосной формы со средним размером равным  $(0.09 \pm 0.05)$  мкм.

**Ключевые слова:** монокристаллы, никель, одноосное сжатие, кручение под высоким давлением, просвечивающая электронная микроскопия, субструктура, фрагментация, ультрамелкозернистая структура, статистический анализ.

### Введение

Одним из перспективных направлений современного физического материаловедения является получение и исследование ультрамелкозернистых металлических материалов с субмикро- и нано-размерной зеренной структурой [1–4]. Для формирования таких структур широко используются различные методы структурного измельчения, в том числе методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [5, 6]. В настоящее время для обозначения сверхвысоких пластических деформаций широкое распространение получил и другой термин – мегапластическая деформация [7]. Чрезвычайно важным для понимания механизмов деформационного измельчения структур металлических материалов является проведение исследований с использованием чистых металлов в качестве модельных материалов, в отношении которых хорошо известны как основные физические характеристики, так и свойства индивидуальных носителей пластической деформации, влияющие на особенности субструктурных превращений. Имеется ряд работ [8–13], посвященных изучению структуры и свойств ультрамелкозернистого чистого никеля, полученного методами интенсивной пластической деформации из исходно поликристаллического состояния, которое в значительной степени осложняет понимание и трактовку процессов деформационного измельчения структуры. В то же время именно монокристалл, в котором отсутствуют границы зерен, является первым структурным уровнем для структурно-неоднородной среды, формирующейся в процессе пластической деформации. Исследование закономерностей формирования и эволюции структурно-однородных сред является необходимым этапом изучения процессов измельчения структуры материалов под воздействием деформации. Наконец, монокристаллы позволяют управлять числом систем скольжения, что является дополнительным фактором для понимания процессов формирования субструктур деформации. К сожалению, работ, посвященных деформационному измельчению структуры монокристаллического никеля методами ИПД, немного [14–16]. В работе [14] монокристаллы чистого никеля разных кристаллографических ориентировок деформировались методом кручения под высоким давлением в наковальнях Бриджмена до различных степеней деформации [14] и затем методом дифракции обратно рассеянных электронов изучалась эволюция микро-

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003) и частично в рамках государственного задания (тема «Давление», № 122021000032-5).

## Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов с углеродными нанотрубками\*

А.С. Червинская<sup>1</sup>, О.А. Доценко<sup>1,2</sup>, Е.С. Беломытцева<sup>1</sup>, А.О. Качусова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

<sup>3</sup> *Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия*

Представлены результаты влияния ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композиционного материала, в качестве связующего в котором используется вододисперсионная краска. При таком способе обработки в жидкости возникает ультразвуковая кавитация, которая влияет на структурные изменения экспериментальных образцов. Это проявляется в нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости от времени ультразвуковой обработки.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, многостенные углеродные нанотрубки, вододисперсионная краска, ультразвуковая обработка, резонаторный метод, конденсаторный метод.

### Введение

С момента открытия углеродных нанотрубок (УНТ) в 90-е годы прошлого века [1] исследователи предлагают разнообразные применения данных структур. Добавление небольшого объемного количества наночастиц в сталь [2], бетон [3], асфальт [4] улучшают их прочностные характеристики, такие как модуль упругости [2], ударную вязкость [3, 4], прочность на изгиб [2]. В работах, посвященных добавлению многостенных (МУНТ) и одностенных углеродных нанотрубок в лакокрасочные покрытия [5, 6] и ABS-пластик [7], авторы изучают их физико-химические (морозостойкость, стойкость к перепадам температур и др.) и физико-механические (прочность сцепления, коррозионная стойкость, модуль Юнга и др.) характеристики. Добавление МУНТ в магнитную жидкость приводит к модификации ее диэлектрических свойств [8].

В работах [9–12] рассматриваются композиты с углеродными нанотрубками для применения в качестве поглощающих покрытий для стелс-технологий. Благодаря применению таких поглощающих покрытий снижается уровень электромагнитного излучения, оказывающего вредное влияние на биологические объекты; уменьшается скачок волнового сопротивления объектов в микроволновом, инфракрасном и других диапазонах электромагнитного излучения.

Существуют различные методы изготовления полимерных композитов на основе УНТ: центрифугирование, перемешивание в растворителе и др. [13]. При этом обработка внешним воздействием должна проводиться в течение времени, достаточного для равномерного распределения УНТ по всей матрице полимера.

Одним из методов является изготовление композитов с применением ультразвуковой обработки (УЗО). При таком способе обработки в жидкой фазе возникает кавитация в результате местного понижения давления в жидкости, которое возникает при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения. Перемещаясь вместе с потоком жидкости во время полупериода сжатия, кавитационный пузырек схлопывается, излучая при этом ударную волну.

Известно, что когда в жидкость погружается капилляр и при этом проводится УЗО, наблюдаются некоторые явления, называемые звукокапиллярным эффектом [14]. Этот эффект наиболее ярко проявляет себя в режиме кавитации: если под срезом капилляра возбуждается кавитационный процесс, то в капилляре формируется поток жидкости [14, 15]. При этом различают два эффекта: уменьшение вязкости и увеличение высоты подъема жидкости в капилляре. N.V. Dezhkunov и T.G. Leighton [16] предположили, что кавитационные пузырьки, образующиеся на открытом конце капиллярной трубки, способствуют накоплению давления внутри трубки, приводящего к повышению высоты жидкости в ней. Розин и др. [14] предположили обратное, а имен-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, соглашение № 23-29-00686.

## Исследование структуры поверхности и фазовых превращений в биосовместимых пористых сплавах на основе никелида титана, полученных методом диффузионного спекания\*

С.Г. Анিকেев<sup>1</sup>, О. Мамазакиров<sup>1</sup>, В.Н. Ходоренко<sup>1</sup>, Н.В. Артюхова<sup>1</sup>, М.И. Кафтаранова<sup>1</sup>,  
А.В. Шабалина<sup>1</sup>, С. Пахолкина<sup>1</sup>, О.В. Кокорев<sup>1</sup>, В.Э. Гюнтер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Исследована террасовидная поверхность стенок пор биосовместимых материалов на основе никелида титана, полученных методом диффузионного спекания. Методами оптической и растровой электронной микроскопии с помощью стереометрических методик исследованы параметры порового пространства: пористость, распределение пор и межпоровых перепонок по размерам, проницаемость и извилистость пор. Показано, что с помощью добавок Ti возможно решать задачу коррекции атомного состава соединения TiNi для реализации мартенситных превращений в пористых материалах, полученных методом диффузионного спекания. Изучены особенности формирования шероховатой террасовидной поверхности стенок пор. Установлено, что добавка 5 ат.% Ti является оптимальной для достижения условий реализации мартенситных превращений в интервале, близком температуре организма человека, при этом сохраняется регулярная пористая структура с коэффициентом проницаемости 41 Д.

**Ключевые слова:** пористый никелид титана, диффузионное спекание, террасовидный рельеф, извилистость, проницаемость, мартенситные превращения.

### Введение

Сплавы на основе никелида титана (TiNi) занимают особое место в имплантологии благодаря широкому спектру их функциональных и конструкционных свойств (сверхэластичность, эффекты памяти формы, гистерезисные свойства), которые обеспечивают биомеханическую и биохимическую совместимость. Основным условием биомеханической совместимости является соответствие деформационного поведения металлических сплавов поведению тканей организма [1–4]. Известно, что биологические ткани деформируются по гистерезисному закону [5–7]. Из широкого спектра медицинских материалов гистерезисному поведению соответствуют только сплавы с памятью формы. Благодаря мартенситным превращениям (МП) в них возможна реализация гистерезисной зависимости формоизменения под нагрузкой. В отличие от монолитного, в пористом сплаве эффекты памяти формы и сверхэластичности проявляются в более широком температурном интервале и характеризуются большим гистерезисом.

Пористые сплавы на основе никелида титана получают разными методами порошковой металлургии, которые хорошо изучены. Биосовместимые пористые материалы на основе TiNi получают методами спекания и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [4]. Формирование поверхности материала при спекании и СВС имеет свои характерные особенности, которые определяются процессами диффузии и массопереноса при технологическом процессе получения [8–10]. Структурные характеристики сплавов определяют их механические и физико-химические свойства, а также играют важную роль в процессах взаимодействия с тканями организма при функционировании имплантатов в организме [1]. Особое значение для адгезии с живыми тканями имеют свойства поверхности стенок пор материала на основе никелида титана. Известно, что шероховатая структура поверхности и развитая топография способствуют адгезии клеточных популяций, что приводит к успешной интеграции имплантируемого устройства.

При спекании получаемый материал наследует структурный и фазово-химический состав порошка TiNi [11]. Фазовый состав такого материала более однороден по сравнению с TiNi-СВС [11–13]. Фазово-химический состав пористого каркаса главным образом влияет на механические свойства, состояние поверхности пористого сплава влияет на его биохимическую совместимость. Пористость, средний размер и распределение пор по размерам, морфология поверхности стенок пор – основные структурные параметры пористых материалов, определяющие характер взаимодействия в паре «имплантат – ткань» [14–17].

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10045, <https://rscf.ru/project/19-79-10045/>.

## Исследование магнитных свойств никель-цинковых ферритов термомагнитометрическим методом\*

Е.В. Николаев<sup>1</sup>, Е.Н. Лысенко<sup>1</sup>, С. Бобуёк<sup>1</sup>, А.П. Суржиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Исследовано влияние температурного режима синтеза на образование магнитофазовых переходов никель-цинковых ферритов ( $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) с содержанием цинка  $0 \leq X_{\text{Zn}} \leq 0.7$ . Порошки исходных оксидов смешивали с применением высокоэнергетической шаровой мельницы Retsch Emax для гомогенизации смеси и увеличения реакционной способности. Образцы никель-цинкового феррита изготавливались по керамической технологии. Твердофазный синтез осуществляли при температуре 800, 900 и 950 °С в течение 4 ч. Методом рентгенофазового и термического анализов установлены закономерности формирования конечной ферритовой фазы в зависимости от режимов синтеза. Получены калибровочные кривые температуры Кюри от степени легирования никелевого феррита цинком, позволяющие детектировать магнитную фазу по температуре Кюри.

**Ключевые слова:** *никель-цинковый феррит, рентгенофазовый анализ, термогравиметрический анализ, температура Кюри.*

### Введение

Магнитомягкие ферриты находят широкое применение в радиоэлектронике и радиотехнике благодаря своим электрическим и магнитным свойствам [1, 2]. Наночастицы ферритов интенсивно исследуются для применения в медицине [3], в качестве переносчика лекарств [4], маркировки клеток и т.д. [5]. К таким материалам относят и никель-цинковые феррошпинели с химической формулой  $\text{Ni}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  (Ni–Zn), которые представляют собой широкий класс магнитно-мягких ферритовых материалов. Высокая востребованность применения Ni–Zn ферритов в различных сферах науки и техники [6–8] обуславливает наличие множества химических и физических способов получения такого типа феррошпинелей. Стоит отметить, что различные методы синтеза могут приводить к образованию ферритов с различными значениями параметров структурных, электрических и магнитных свойств. К современным и эффективным методам получения ферритов сложного состава относят следующие методы синтеза: метод химического соосаждения [9], самовозгорания [10, 11], золь-гель [12] и термического разложения солей [13]. Все перечисленные методы широко применимы при синтезе замещенных феррошпинелей.

Однако наиболее распространенным способом промышленного производства ферритовых порошков является керамический метод [14, 15], в процессе которого все исходные компоненты представляют собой порошки, как правило, оксиды, которые смешиваются в необходимых пропорциях. Полученная шихта спекается в промышленных печах при заданном давлении и температуре. Несмотря на простоту керамического метода, после процесса синтеза необходимо проведение контроля качества полученных изделий.

Существенная зависимость свойств ферритов от фазового и химического составов приводит к необходимости тщательного их контроля на каждом из этапов производства ферритовых порошков. Наиболее часто используемым методом контроля в промышленности является рентгенофазовый анализ (РФА) [16, 17]. Однако в процессе синтеза ферритов образование конечной фазы протекает через ряд промежуточных фаз, обладающих близкими значениями параметра решетки. Рефлексы от таких фаз сливаются в единые пики, уширяя их на дифрактограммах, что впоследствии затрудняет их качественную и количественную оценку. Таким образом, существует необходимость в разработке метода контроля фазовой гомогенности сложных многокомпонентных магнитных материалов. В качестве такого метода предлагается использовать метод термомагнитометрического анализа [18], который основан на наблюдении изменения веса в постоянном магнитном поле в процессе термического анализа исследуемого вещества [19]. Хорошо известно, что в процессе нагрева ферромагнитные материалы претерпевают магнитофазовый переход, вызванный разрушением доменной структуры. В области такого перехода на термогравиметрических кривых (ТГ-кривые) наблюдается изменение веса образца в зависимости от взаимного

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

## ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.533

DOI: 10.17223/00213411/66/5/15

**О применимости «плазменного приближения»  
к кинетическому рассмотрению распада вакуумной плазмы  
в свободном пространстве\***В.Ю. Кожевников<sup>1</sup>, А.В. Козырев<sup>1</sup><sup>1</sup> *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Одним из ключевых подходов к решению целого класса современных задач физики плазмы является так называемое «плазменное приближение». Проведено сравнение результатов численного моделирования кинетических процессов разлета квазинейтрального плазменного сгустка без использования «плазменного приближения» с аналитическим автомоделным решением аналогичной кинетической модели, которое было получено ранее в «плазменном приближении». Обсуждаемые результаты получены с помощью детерминистического кинетического моделирования, основанного на численном решении системы уравнений Власова – Пуассона. Полученные результаты показывают недостатки и ограничения метода «плазменного приближения» на примере одномерной задачи о бесстолкновительном разлете плотного плазменного сгустка.

**Ключевые слова:** *бесстолкновительная плазма, плазменное приближение, кинетическое уравнение Власова.*

**Введение**

Теоретическая проблема распада вакуумной плазмы привлекает большое внимание в связи с ее значимостью для решения задач вакуумной электроники и приложений. В последние десятилетия изучались различные модели полубесконечного разлета плазмы [1–4]. В большинстве работ теоретические исследования проводились как аналитически, так и с применением численных методов расчета (например, [5–7]). Несколько позже появилась теоретическая интерпретация явления разлета плазменного сгустка в терминах физической кинетики. Принято считать, что подобные модели имеют наибольшую фундаментальную ценность, так как основаны на решении уравнений Власова в «плазменном приближении» (например, [8]).

Так называемое «плазменное приближение» (plasma approximation) представляет собой фундаментальный широко распространенный теоретический подход к решению, применимый к стационарным и низкочастотным явлениям физики плазмы, в том числе и в области управляемого термоядерного синтеза (например, [9, 10]). С теоретических позиций, однако, «плазменное приближение» может сделать уравнения движения внутренне рассогласованными и помешать правильному теоретико-полевому описанию состояния ансамбля заряженных частиц. Это утверждение следует из того, что при переходе плазмы в квазинейтральное состояние  $n_e \approx n_i$  (где  $n_e$  и  $n_i$  – функции концентраций электронов и однозарядных ионов в двухкомпонентной плазме) ее плотность объемного заряда становится близкой к нулю  $\rho \approx 0$ . Данное равенство, согласно уравнению Пуассона, приводит к тому, что при нулевых начальных условиях напряженность электрического поля  $E = 0$ . Подход «плазменного приближения» тем не менее полагает, что  $E \neq 0$ , а конкретное значение напряженности электрического поля находится из других соображений [9]. Такое формальное разделение уравнений плазмы и поля в большинстве случаев приводит к неоднозначной интерпретации процедуры определения электрического поля.

С фундаментальных позиций физическая кинетика уточняет понятие «квазинейтральности плазмы». В физической кинетике концентрации частиц являются нулевыми моментами соответствующих функций распределения  $f_e$  и  $f_i$  для электронов и ионов соответственно. Концентрации, таким образом, представляют собой лишь частные макроскопические характеристики определенных

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам № FWRM-2021-0007, FWRM-2021-0014.

## Импеданс-спектроскопия неоднородной неоновой плазмы

Т.Х. Гусейнов<sup>1</sup>, Э.А. Расулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика*

В неоднородной плазме неона при различных значениях разрядного тока измерен импеданс разряда и получены различающиеся по форме динамические характеристики. Установлено, что в случае сужения разряда в сторону анода основным механизмом образования заряженных частиц является прямая ионизация атомов неона электронным ударом с основного состояния. При противоположном протекании тока преобладает ступенчатая ионизация с метастабильного  $1s_5$ -уровня, так как оценки показали, что во всем исследованном диапазоне суммарная ступенчатая ионизация с остальных трех уровней составляет не более 20% от числа ионизаций с этого уровня.

**Ключевые слова:** *газовый разряд, импеданс, годограф, возбуждения, ионизация, время жизни электронов, время жизни метастабильных атомов.*

### Введение

Рост требований к устойчивости и стабильности характеристик газоразрядных приборов, в том числе газовых лазеров, стимулирует исследование динамических характеристик разряда [1–3]. Этим объясняется также и повышенный интерес к исследованию нестационарных переходных процессов в плазме, а также самопроизвольно возникающих в разряде различного типа неустойчивостей, колебаний и волн.

Колебательные процессы приводят к флуктуациям и возбуждениям страт, колебаниям интенсивности излучения лазеров, заметно влияют на пороги генерации, параметры излучения и другие свойства оптических квантовых генераторов.

Так как использование конических разрядных трубок с весьма небольшими углами раствора взамен цилиндрических позволяет заметно сократить область параметров существования самовозбуждающихся бегущих страт и других колебательных процессов, по силе разрядного тока и давлению, то переход к коническим трубкам открывает широкие возможности по стабилизации работы газовых лазеров [2, 4]. Поэтому изучение природы различных типов колебаний в конических трубках представляет значительный интерес. С этой точки зрения представляет интерес также изучение динамических свойств конического разряда с помощью динамического сопротивления (или импеданса). Знание динамического сопротивления как функции параметров разряда позволяет предсказывать свойства собственных колебаний разряда, находить пути их подавления и ослабления.

Традиционно вычисление импеданса разрядов среднего и высокого давления проводилось в цилиндрических трубках с учетом множества элементарных процессов [5–9]. Получены интересные качественно отличающиеся кривые импеданса, дана физическая интерпретация выявленных особенностей. Оценена роль влияния отношения чисел прямых и ступенчатых ионизаций, дано объяснение сложной структуры кривых импеданса, связанной с инерцией теплопроводности нейтрального газа [10, 11], ионизационной инерционностью прямых и ступенчатых процессов [5, 6]. В этих работах цилиндрическая геометрия позволяет относительно просто, методом малых возмущений, в приближении времени жизни аналитически вычислить динамическое сопротивление положительного столба (ПС). В сочетании с экспериментально измеренными кривыми импеданса удается восстановить полную картину динамических свойств разряда. В трубках конической формы в разных частях разряда скорость исчезновения заряженных частиц изменяется из-за плавного изменения диаметра трубки. Поэтому возникают трудности при интерпретации экспериментально полученных характеристик, а применение обычных методов вычисления импеданса является сомнительным.

В настоящей работе измерено динамическое сопротивление разряда в неоне в конической трубке при различных значениях разрядного тока и получены различающиеся по форме динамические характеристики. С целью объяснения этих отличий проведено комплексное изучение разряда в конической трубке [12, 13]. Измерены концентрации и функции распределения электронов по энергиям, а также заселенности четырех нижних возбужденных уровней атома неона по по-

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 538.911; 548.4; 620.186.8; 620.172.2

DOI: 10.17223/00213411/66/5/17

**Низкотемпературный синтез интерметаллидных фаз  
в наноструктурированном механокомпозите системы 3Ni–Al\***Д.А. Осипов<sup>1,2</sup>, И.В. Смирнов<sup>1,2</sup>, К.В. Гриняев<sup>1,2</sup>, И.А. Дитенберг<sup>1,2</sup><sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*<sup>2</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

Проведено исследование особенностей изменения структурно-фазового состояния механоактивированной порошковой смеси 3Ni–Al в процессе низкотемпературных отжига. Установлено, что релаксация наиболее дефектных структурных состояний способствует снижению значений микротвердости. Показано, что в локальных участках достигаются условия синтеза интерметаллидных фаз при относительно низких температурах, по сравнению с температурами образования этих фаз в соответствии с фазовой диаграммой состояний системы. Предполагается, что причиной этого является сочетание эффективного механического перемешивания и ускорения диффузии по дефектной структуре.

**Ключевые слова:** высокоэнергетическая механическая активация, механокомпозит 3Ni–Al, высокодефектное наноструктурное состояние, низкотемпературный отжиг, интерметаллиды, микротвердость.

Высокоэнергетическая механическая активация (МА) порошков металлов и смесей на их основе приводит к формированию в них высокодефектных субмикроструктурных состояний аналогично методам больших пластических деформаций [1–5]. В соответствии с существующими физическими представлениями увеличение плотности дефектов кристаллического строения повышает запасенную энергию, что может содействовать росту реакционной способности и, как следствие, снижению температуры синтеза соединений [6–11].

В настоящей работе проведено изучение особенностей низкотемпературного синтеза интерметаллидных соединений в порошковой смеси 3Ni (99.85%, марки ПНК 1Л5) – Al (98%, марки ПА-4) после МА в энергонапряженной планетарной шаровой мельнице АГО-2 с водяным охлаждением. Продолжительность МА составляла 3.5 мин, в качестве мелющих тел использованы стальные шары. Для предотвращения окисления обработку и выгрузку образцов осуществляли в атмосфере аргона. Полученный прекурсор подвергли часовым отжигам в среде аргона при температурах 150, 210 и 250 °С.

Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) было проведено с использованием электронного микроскопа PHILIPS CM-12 (120 кВ). Аттестация микроструктуры прекурсора после МА проведена с использованием метода темнопольного анализа разориентировок дискретного и непрерывного типа [5]. Исследования методом рентгеноструктурного анализа (РСА) проведены на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н (CuK<sub>α</sub>-излучение).

Микротвердость (H<sub>V</sub>) определяли методом Виккерса на приборе «Neophot 21» с нагрузкой 0.5 Н при выдержке 15 с. Измерения проведены на отдельных частицах порошка и их конгломератах, для чего изготавливали компакты на основе смеси порошков с эпоксидным клеем.

На светлопольном и темнопольном изображениях видно (рис. 1, а, б), что частица порошка размерами около 200 нм состоит из отдельных зерен-кристаллитов, размеры которых варьируются от нескольких нанометров до нескольких десятков нанометров. Внутри этих нанокристаллитов наблюдается сложный дифракционный контраст. Соответствующая картина микродифракции характеризуется квазикольцевой конфигурацией дифракционных максимумов, размытых в азимутальном направлении от 5 до 10° (рис. 1, в). Установлено, что внутри зерен формируются высокодефектные структурные состояния с кривизной кристаллической решетки, достигающей нескольких десятков град/мкм.

Методом РСА в работе [12] показано, что в процессе МА в прекурсор происходит синтез интерметаллидной фазы Ni<sub>3</sub>Al, объемная доля которой после 3.5 мин активации составляет 7%. В настоящей работе на основе данных РСА установлено, что после отжига при 150 °С объемная доля Ni<sub>3</sub>Al увеличивается на 3% при соответствующем снижении объемных долей Ni и Al. В случае отжига при температуре 200 °С объемная доля Ni<sub>3</sub>Al увеличивается до 12%. Более существенные изменения фазового состава прекурсора происходят при повышении температуры отжига до 250 °С. Помимо наличия интерметаллидной фазы Ni<sub>3</sub>Al, объемная доля которой составляет 12%, обнаружена фаза Al<sub>3</sub>Ni, объемная доля которой составляет 9%. Ее формирование приводит к локальному нарушению стехиометрической пропорции (3:1) несвязанных Ni и Al.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

УДК 538.911; 669.017.15; 669-138

DOI: 10.17223/00213411/66/5/18

### Фазовый состав и микротвердость эквивалентной порошковой смеси W–Ta–Mo–Nb–Zr–Cr–Ti после механической активации и высокотемпературного отжига\*

И.А. Дитенберг<sup>1,2</sup>, Д.А. Осипов<sup>1,2</sup>, И.В. Смирнов<sup>1,2</sup>, К.В. Гриняев<sup>1,2</sup>, В.И. Толстихин<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Изучено влияние высокотемпературного отжига на синтез и трансформацию фаз в многокомпонентной эквивалентной смеси W–Ta–Mo–Nb–Zr–Cr–Ti после предварительной энергонапряженной механической активации разной продолжительности. Методом рентгеноструктурного анализа определены основные фазы и их объемные доли. Установлено, что высокотемпературный отжиг приводит к снижению микротвердости прекурсоров многокомпонентной смеси по сравнению с механической активацией. Предполагается, что определяющим фактором формирования гомогенного или близкого к нему фазового состояния является температура отжига или синтеза, при которой наиболее эффективны диффузионные процессы перераспределения элементов в прекурсорах.

**Ключевые слова:** высокоэнергетическая механическая активация, механокомпозит, высокотемпературный отжиг, фазовый состав, микротвердость.

Как известно [1–11], механическая активация (МА) широко применяется при получении многокомпонентных сплавов на основе тугоплавких металлов на стадии создания прекурсоров из эквивалентных и неэквивалентных смесей порошков для последующего искрового плазменного спекания (ИПС). Такой подход позволяет синтезировать многокомпонентные соединения при более низких температурах, по сравнению с температурами, необходимыми для сплавления входящих тугоплавких компонентов. В этой связи одной из актуальных задач является изучение особенностей формирования и трансформации фаз в процессе МА, синтеза и термических обработок. В настоящей работе представлены результаты изучения влияния высокотемпературного отжига на синтез и трансформацию фаз в зависимости от продолжительности предварительной МА многокомпонентной эквивалентной смеси W–Ta–Mo–Nb–Zr–Cr–Ti.

Прекурсоры из порошковой смеси указанного состава получали путем МА продолжительностью 10.5 и 20.5 мин в энергонапряженных планетарных шаровых мельницах АГО-2. Режим подробно представлен в работе [10]. После МА прекурсоры подвергали часовому отжигу в вакууме при температуре 1250 °С.

Исследование методом рентгеноструктурного анализа проведено на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000 (CuK<sub>α</sub>-излучение). Полнопрофильный рентгенофазовый анализ на основе метода Ритвельда проведен с использованием программного обеспечения Powder Cell 2.4 и «Match!», а также базы данных PDF-4 (The Powder Diffraction File 4). Микротвердость определяли методом Виккерса на приборе «Neophot 21» (нагрузка – 0.5 Н; выдержка – 15 с). Измерения проведены как на отдельных частицах порошка, так и их конгломератах, для чего изготавливали компакты на основе смеси порошков с эпоксидным клеем.

В табл. 1 приведены данные об основных фазах, параметрах их решеток и занимаемой объемной доли в порошковой смеси после 10.5 мин МА и отжига при 1250 °С. В работе [10] было показано, что непосредственно после МА данной продолжительности основными фазами являются ОЦК-1, наиболее близкая к эквивалентному составу, и ОЦК-2 с повышенным содержанием тантала. После отжига основной объем приходится на фазу ОЦК-3, параметр решетки которой находится между ОЦК-1 и ОЦК-2. Кроме того, обнаружена фаза ОЦК-4, занимающая до 6% объемной доли, параметр решетки которой также находится между ОЦК-1 и ОЦК-2. При этом параметр решетки ОЦК-3 ближе к ОЦК-1, в то время как параметр ОЦК-4 ближе к ОЦК-2. Прослеживается наследие проявляющегося после МА разделения по вольфраму и танталу [10]. Фактически все обнаруженные ОЦК-фазы являются смесями, которые содержат все компоненты (W, Ta, Mo, Nb, Zr, Cr, Ti),

Таблица 1

Основные фазы, параметры их решеток и объемные доли после 10.5 мин МА и отжига

Фаза	Параметры решетки, нм	Объемная доля, %
ОЦК-1	$a = 0.3165$	7
ОЦК-2	$a = 0.3306$	1
ОЦК-3	$a = 0.3203$	78
ОЦК-4	$a = 0.3273$	6
ZrO <sub>2</sub>	$a = 0.5115; b = 0.5281; c = 0.5304$	3
TiO <sub>2</sub>	$a = 0.3804; c = 0.9620$	5

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0008.

УДК 621.384

DOI: 10.17223/00213411/66/5/19

## Рентгенофазовый анализ с использованием синхротронного излучения покрытий бора, нанесенных методом электронно-лучевого испарения\*

А.Г. Николаев<sup>1</sup>, А.А. Андронов<sup>2</sup>, А.В. Казаков<sup>1,2</sup>, Ю.Г. Юшков<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Рассматривается метод нанесения покрытия бора на поверхность с помощью электронно-лучевого испарения твердотельной мишени из чистого кристаллического бора электронным пучком при форвакуумном давлении. Структурно-фазовые характеристики полученных покрытий были исследованы с помощью рентгенофазового анализа с высоким инструментальным разрешением при использовании синхротронного излучения, генерируемого накопителем со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-3 Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Было показано, что полученные покрытия бора обладают высокой стабильностью при температуре до 1200 °С и нагрев до такой температуры не приводит к заметному изменению их структуры.

**Ключевые слова:** покрытия бора, электронно-лучевое испарение, форвакуумный источник электронов, рентгенофазовый анализ, синхротронное излучение.

Одним из перспективных путей нанесения покрытия бора на поверхность является использование метода электронно-лучевого испарения твердотельной мишени электронным пучком при форвакуумном давлении [1, 2]. При этом поверхность мишени из бора локально нагревается сфокусированным электронным пучком и из расплавленной области на поверхности мишени осуществляется интенсивное испарение. Поток испаренных атомов бора, частично ионизованный пучком, осаждается на поверхность подложки и образует покрытие. Скорость осаждения покрытий бора при этом методе намного выше, чем при магнетронном напылении или дуговом напылении [3] и может достигать 1 мкм/мин [2], что обеспечивает более высокую производительность нанесения покрытий. Характеристики и свойства борсодержащих покрытий могут изучаться различными методами анализа поверхности. В настоящей работе рассматривается метод исследования структурно-фазовых характеристик покрытия с помощью рентгенофазового анализа (РФА) с высоким инструментальным разрешением при использовании синхротронного излучения, генерируемого накопителем со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-3 Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН.

Для тестовых испытаний были подготовлены три группы образцов (далее – образцы № 1, 2, 3) из реакторного сплава Э110 (ZrNb1) с гексагональной кристаллической решеткой. Они представляли собой диски диаметром 2 см и толщиной 0.5 см с полированной поверхностью, на которую наносились борсодержащие покрытия. Перед началом работы вакуумная камера откачивалась до остаточного давления 1 Па, затем заполнялась рабочим газом – азотом с чистотой 99.9% до давления 10 Па. Процесс испарения мишени, изготовленной из кристаллического бора чистотой 99.6%, и нанесение покрытия бора на поверхность образца проходили при токе электронного пучка более 100 мА и ускоряющем напряжении 10 кВ, при этом температура ванны расплава составляла около 2400 °С. Покрытия бора наносились в течение 5 мин и имели толщину 2 мкм при плотности покрытия около 2.2 г/см<sup>3</sup>, что близко к плотности кристаллического бора – 2.34 г/см<sup>3</sup>. После этого образцы № 1 были оставлены без изменения, а образцы № 2 и 3 были подвергнуты обработке импульсным электронным пучком длительностью 500 мкс с энергией электронов 6 кэВ и импульсным током 20 А (образцы № 2) и 6 кэВ и 30 А (образцы № 3). Количество импульсов пучка для образцов № 2 и 3 было одинаково – 300 импульсов, а импульсная мощность пучка различалась – 120 и 180 кВт соответственно. Образцы из каждой группы подвергались анализу элементного состава полученных покрытий, выполненному с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S3400N, оснащенного приставкой энергодисперсионного микроанализа BrukerXFlash 5010, и РФА с использованием синхротронного излучения ВЭПП-3.

Элементный анализ состава полученных покрытий показал, что доля атомов бора в покрытиях составляет около 95 ат.%. Но на общих рентгенограммах полученных покрытий с длиной волны 0.154 нм (рис. 1, а) не было обнаружено рефлексов, свидетельствующих об образовании значительных долей фаз кристаллических бора или нитрида бора. Это может свидетельствовать о том, что бор присутствует в покрытии в виде аморфной или, напротив, ультрадисперсной фазы. Кроме того, на рентгенограммах образцов № 1 и 2 наблюдаются рефлексы слабой интенсивности и значительной ширины, среди которых выделяются два

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 2.1.6.

*Ежемесячный научный журнал*

**ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА**  
**IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA**

**2023. Т. 66. № 5**

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

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

---

Подписано к печати 22.05.2023. Выпуск в свет 31.05.2023. Заказ № 5469.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.  
Усл. п. л. 16.74. Уч.-изд. л. 18.75. 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](mailto:rio.tsu@mail.ru)

