

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

7·2025

**ИЗДАНИЕ
ТОМСКОГО ГОСУНИВЕРСИТЕТА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0021–3411

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ФИЗИКА

IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

Том 68

Июль, 2025

№ 7 (812)

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Основан в 1957 г.

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

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

12+

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

Учредитель:

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

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

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 36
Телефон: +7(3822) 53-33-35, 78-37-02
Сайт: <http://journals.tsu.ru/physics/>
E-mail: physics@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Козырев А.В., Семенюк Н.С. Критерии и динамика электрического пробоя газонаполненного диода на левой ветви кривой Пашена	5
Юшков Г.Ю., Гридилов В.Г. Немонотонная зависимость плотности плазмы от давления газа магнетронного разряда с мишенью из бора	12

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

Маркова А.А., Садовников С.А., Герасимова М.П., Яковлев С.В., Крючков А.В., Кравцова Н.С., Кистенев Ю.В. Использование узкополосного лазерного диода в задачах дистанционного газоанализа атмосферы	21
---	----

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В., Федорова А.В. Твердорастворное упрочнение атомами азота монокристаллов $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4,8}\text{N}_{0,2}$ высокоэнтропийного сплава	29
Степанов Н.П., Грабко Г.И. Релаксационные процессы в природном пирите, происходящие под воздействием постоянных и переменных электрических полей	37
Левин Ю.К. Методика расчета давления нанопузыря в воде	45
Милинский А.Ю., Барышников С.В., Стукова Е.В. Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе иодида диизопропиламмония и микрочастиц меди	50
Ивченко В.А. Полевая ионная микроскопия структурной модификации поверхности ЖСЗ6-ВИ после бомбардировки Ag^+ (30 кэВ)	57
Давыдов Р.В., Гольдберг А.А., Проводин Д.С., Давыдов В.В., Дудкин В.И. О влиянии поля модуляции и частотного сдвига спинового взаимодействия на формирование сигналов поглощения и дисперсии ядерного магнитного резонанса при их регистрации в слабых полях	65

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Беляев Б.А., Сержантов А.М., Бальва Я.Ф., Лексиков А.А., Крёков С.Д., Поминов К.И., Бурлаков И.Е. Высокоизбирательный полосно-пропускающий фильтр для входного мультиплексора спутниковой связи С-диапазона	79
---	----

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Новиков П.Л., Павский К.В., Цынк П.Н. Моделирование димеризации атомов на поверхности структурированных подложек Si	87
Хахулин С.А., Коляда Д.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Тимофеев В.А., Скворцов И.В., Машанов В.И., Гайдук А.Е., Уткин Д.Е. Влияние прямоугольных алюминиевых наноантенн на оптическое излучение множественных квантовых ям GeSiSn/Si	95

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Мусин А.И., Самойлов В.Н. Влияние атомов поверхности грани (001) Au на коэффициент ионного распыления: сравнение с теорией Зигмунда	103
---	-----

CONTENTS

PLASMA PHYSICS

Kozyrev A.V., Semeniuk N.S. Criteria and dynamics of electrical breakdown of gas-filled diode on left branch of Paschen curve.....	5
Yushkov G.Yu., Gridilev V.D. Nonmonotonic dependence of plasma density on gas pressure in magnetron discharge with a boron target	12

OPTICS AND SPECTROSCOPY

Markova A.A., Sadovnikov S.A., Gerasimova M.P., Yakovlev S.V., Kryuchkov A.V., Kravtsova N.S., Kistenev Yu.V. Using a narrow-band laser diode in remote atmospheric gas analysis	21
---	----

CONDENSED-STATE PHYSICS

Kireeva I.V., Chumlyakov Y.I., Pobedennaya Z.V., Fedorova A.V. Solid solution hardening with nitrogen atoms of $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$ high-entropy alloy single crystals.....	29
Stepanov N.P., Grabko G.I. Relaxation processes in natural pyrite occurring under the influence of constant and alternating electric fields.....	37
Levin Yu.K. Methodology for calculating the pressure of a nanobubble in water	45
Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Stukova E.V. Dielectric and thermal properties of composites based on diisopropylammonium iodide and copper microparticles.....	50
Ivchenko V.A. Field ion microscopy of the structural modification of the ZhS36-VI surface after Ar^+ (30 keV) bombardment	57
Davydov R.V., Gol'dberg A.A., Provodin D.S., Davydov V.V., Dudkin V.I. Influence of modulation field and frequency shift of spin interaction on the formation of absorption and dispersion signals of nuclear magnetic resonance when they are recorded in weak fields	65

PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Ya.F., Leksikov A.A., Krekov S.D., Pominov K.I., Burlakov I.E. A highly selective bandpass filter for C-band channel satellite's input multiplexer	79
---	----

PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS

Novikov P.L., Pavsky K.V., Zynk P.N. Simulation of dimerization on the surface of Si pit-patterned substrates.....	87
Khakhulin S.A., Kolyada D.V., Firsov D.D., Komkov O.S., Timofeev V.A., Skvortsov I.V., Mashanov V.I., Gayduk A.E., Utkin D.E. Effect of rectangular aluminum nanoantennas on the optical emission of GeSiSn/Si multiple quantum wells.....	95

BRIEF COMMUNICATIONS

Musin A.I., Samoilov V.N. Influence of atoms of the (001) Au face on the ion sputtering yield: comparison with Sigmund theory	103
--	-----

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

DOI: 10.17223/00213411/68/7/1

Критерии и динамика электрического пробоя газонаполненного диода на левой ветви кривой Пашена*А.В. Козырев¹, Н.С. Семенюк¹¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты теоретического анализа пороговых давлений и напряжений, обеспечивающих пробой плоскопараллельного промежутка, заполненного азотом низкого давления. Выявлены три подхода к расчету пороговых давлений: 1) на основе коэффициента ионизации газа Таунсенда, 2) на основе диода с плазменным катодом и 3) на основе диода с автоэмиссионным катодом. Два первых подхода дают оценку пороговых давлений сверху и снизу, а третий позволяет уточнить условия пробоя между этими границами критических областей. Проведен расчет пространственно-временной динамики развития разряда с автоэмиссионным катодом, который продемонстрировал, что при пороговых параметрах давления и напряжения газовый разряд низкого давления формируется за время до 100 нс. Показано хорошее согласие предсказаний пороговых критериев с кинетическими расчетами динамики разряда.

Ключевые слова: электрический пробой газа, разряд низкого давления, моделирование газового разряда.

Введение

Работа посвящена исследованию фундаментальных механизмов инициирования газового разряда низкого давления. Под низким давлением здесь подразумеваются такие ситуации, когда средняя длина свободного пробега частиц сравнима или больше геометрического размера промежутка. Разряд низкого давления занимает промежуточное положение между классическим тлеющим разрядом с объемной лавинообразной ионизацией рабочего газа [1] и вакуумным разрядом, горящим в парах электродов [2]. Разряды низкого давления используются широким спектром плазменных устройств и технологических приложений. Это источники электронных или ионных пучков с плазменным эмиттером [3–5], магнетронные разряды и распылительные системы [6, 7], коммутрующие приборы [8–10], системы плазменной обработки деталей с большим объемом [11, 12].

Ключевым процессом в исследовании газового разряда является электрический пробой газонаполненного промежутка, в котором происходит быстрый переход от непроводящего состояния промежутка к состоянию с высокой электрической проводимостью. Этот процесс определяет стартовые режимы работы в технических приложениях газоразрядной плазмы [8–11], но может быть крайне нежелательным, если промежуток используется в качестве электрического изолятора, например, в электрических передающих линиях. Основным параметром электрического пробоя является время его протекания, которое определяет как продолжительность включения газоразрядных приборов, так и необходимые требования к предохранителям, защищающим электрические цепи от короткого замыкания цепи питания.

Цель исследования – теоретический анализ пороговых условий, при которых может инициироваться пробой плоскопараллельного промежутка, заполненного газом низкого давления, и расчет временной динамики его проводимости в области пороговых значений приложенного к диоду напряжения.

Разные подходы к вычислению пороговых напряжений пробоя

Базой для расчета пороговых напряжений пробоя традиционно являются кривые Пашена [1], расчет которых основан на критерии самоподдержания разряда, выражающем баланс процесса лавинного размножения электронов в объеме и обратной связи за счет вторичной ион-электронной

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-72-01005.

Немонотонная зависимость плотности плазмы от давления газа магнетронного разряда с мишенью из бора^{*}

Г.Ю. Юшков¹, В.Г. Гридилов¹

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

Представлены результаты исследований магнетронного разряда с мишенью из бора при постоянном токе уровня 50 мА и давлении рабочего газа в диапазоне 0.1–2 мТорр. Экспериментально показано, что как в случае мишени из бора, так и в контрольных экспериментах с мишенью из меди наблюдается немонотонная зависимость плотности плазмы разряда от давления с минимумом плотности в области давления около 0.3 мТорр. Сделан вывод, что такая немонотонная зависимость обусловлена влиянием двух противоположных тенденций: уменьшения ионизации газа при снижении давления с 1.2 до 0.3 мТорр, при котором значительных изменений параметров разряда еще не происходит, и роста ионизации за счет повышения энергии и количества γ -электронов с катода (мишени), а также температуры электронов плазмы при резком увеличении напряжения горения разряда при дальнейшем снижении давления от 0.3 до 0.1 мТорр.

Ключевые слова: магнетронный разряд, плотность плазмы, зондовые измерения, борсодержащие покрытия.

Введение

Магнетронные распылительные системы постоянного тока [1] находят применение для нанесения на поверхность функциональных покрытий для решения различных задач электроники, оптики, машиностроения и других отраслей современного производства [2]. В настоящей работе приведены результаты исследований параметров плазмы магнетронного разряда с плоской (планарной) мишенью из бора в области давления рабочих газов от 0.1 до 2 мТорр, а также результаты контрольных экспериментов с мишенью из меди. Поскольку при нормальных условиях бор является материалом с низкой удельной электрической проводимостью около 10^{-7} См/см, в случае мишени из этого материала использовалась специфическая магнетронная система с термоизолированной и нагреваемой в самом разряде до температуры 500–700 °С мишенью из чистого бора [3]. При такой температуре проводимость бора, полупроводника с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, повышается, обеспечивая стабильное функционирование разряда. Параметры плазмы измерялись одиночным ленгмюровским зондом, в котором для исключения эффекта изоляции собирающей поверхности зонда непроводящим покрытием бора эта поверхность нагревалась до температуры около 500 °С [4].

Ток магнетронного разряда в большинстве экспериментов составлял 50 мА. Такой низкий ток, нетипичный для магнетронных распылительных систем с металлической мишенью, был ограничен растрескиванием спеченной под давлением из мелкокристаллического порошка бора мишени при резком изменении ее температуры, например, при случайном погасании разряда. Низкое давление рабочего газа было обусловлено спецификой формирования покрытий бора высокой чистоты в случае использования аргона и процесса формирования субоксидов бора при использовании смеси аргона и кислорода, при котором поток атомов кислорода на поверхность синтезируемого покрытия должен быть менее 10^{16} см⁻²·с⁻¹.

Как правило, в магнетронных разрядах снижение давления газа в разрядном промежутке приводит к монотонному уменьшению интенсивности ионизации. На этом принципе функционирует, например, вакуумметр с холодным катодом на основе магнетронного разряда, в котором уменьшение актов ионизации газа при снижении давления приводит к пропорциональному уменьшению ионного тока на коллектор, по которому это давление измеряется [5]. При указанных параметрах магнетрона с мишенью из бора была зарегистрирована немонотонная зависимость плотности плазмы разряда от давления газа, которая наблюдалась для любых рабочих газов. Плотность плазмы разряда при уменьшении давления сначала уменьшалась, а потом резко возрастала. Выявление причин этого эффекта потребовало проведения настоящих исследований.

^{*} Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 24-29-00251 «Синтез борсодержащих покрытий на основе магнетронного распыления и электронно-лучевого испарения твердотельной мишени из чистого бора в среде реактивных газов».

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 504.3.054

DOI: 10.17223/00213411/68/7/3

**Использование узкополосного лазерного диода
в задачах дистанционного газоанализа атмосферы***

А.А. Маркова¹, С.А. Садовников¹, М.П. Герасимова¹, С.В. Яковлев¹,
А.В. Крючков¹, Н.С. Кравцова¹, Ю.В. Кистенев²

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

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

Проведено моделирование дистанционного газоанализа атмосферы в спектральном диапазоне вблизи длины волны 1572 нм. Экспериментально исследованы характеристики узкополосного термостабильного непрерывного лазерного диода с выходной мощностью ≤ 15 мВт, показана возможность перестройки длины волны лазерного диода как в пределах отдельной изолированной линии поглощения CO_2 , так и от линии к линии в полосе поглощения CO_2 . Рассмотрена возможность использования лазерного диода для дальнейших работ по созданию лазерного сенсора для исследования содержания CO_2 в атмосфере.

Ключевые слова: лазерный диод, газоанализ, атмосфера.

Введение

Основная антропогенная нагрузка на атмосферу увеличивается за счет индустриального воздействия предприятий различных областей промышленности и транспорта. Например, при антропогенном воздействии и увеличении их предельно допустимой концентрации (ПДК) парниковые газы (H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3) являются загрязняющими. Выбросы CO_2 (источники: горение ископаемых видов топлива (уголь, нефть, газ), сжигание попутного газа, производство цемента, выхлопные газы бензиновых и дизельных двигателей) вызвали его рост более чем на 50% с доиндустриального периода и оказывают большое влияние на антропогенное загрязнение как в региональных, так и в глобальных масштабах. С точки зрения дистанционного газоанализа атмосферы и создания технических средств зондирования особое внимание сегодня уделяется ближнему [1–5] и среднему [3–5] инфракрасным (ИК) диапазонам спектра ввиду расположения в них большого числа колебательных и колебательно-вращательных линий и полос поглощения газовых примесей, дающих вклад в антропогенную нагрузку атмосферы. Цель данной работы – исследование возможностей создания отдельного канала для газоанализа атмосферы (в частности, зондирования CO_2) с использованием узкополосного лазерного диода в ближней ИК-области спектра.

**1. Моделирование спектра поглощения атмосферы
и обратнорассеянного сигнала в спектральной области ~ 1570 нм**

Одной из предпочтительных полос поглощения для зондирования CO_2 является спектральный диапазон работы коммерчески доступных лазерных диодов ~ 1570 нм. При проведении исследований использован лазерный диод [6] со следующими характеристиками: повышенная температурная стабильность, оптоволоконный вывод, длины волн $\lambda_{\min} = 1567$ нм, $\lambda_{\max} = 1573$ нм, $\lambda_{\text{typ}} = 1568.9$ нм (номинальное значение, определенное производителем при поставке), оптическая мощность не более 15 мВт в непрерывном и 45 мВт в импульсном режиме, корпус с термоэлектроохладителем и термистором, одномодовое волокно, диаметр сердцевины волокна 0.9 мм, длина (1000 ± 100) мм, коннектор FC/APC.

Вблизи исследуемой спектральной полосы ~ 1570 нм был рассчитан спектр поглощения атмосферы для среднеклиматической модели лета средних широт. В табл. 1 приведены входные данные для проведения расчета.

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

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 669:539.374.548.55:539.25

DOI: 10.17223/00213411/68/7/4

**Твердорастворное упрочнение атомами азота
монокристаллов $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$
высокоэнтропийного сплава***И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹, З.В. Победенная¹, А.В. Федорова¹¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Впервые на $[\bar{1}44]$ - и $[\bar{1}11]$ -монокристаллах $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$ высокоэнтропийного сплава показано, что легирование азотом концентрацией 0.2 ат.% подавляет ГЦК–ГПУ-мартенситное превращение, которое развивается в монокристаллах $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ без азота, и стабилизирует ГЦК-фазу. Температурная зависимость критических скалывающих напряжений $\tau_{\text{кр}}(T)$ определяется скольжением и $\tau_{\text{кр}}$ не зависят от ориентации кристалла в температурном интервале 77–573 К при растяжении. Показано, что азот концентрацией 0.2 ат.% приводит к локализации деформации и развитию планарной структуры с плоскими скоплениями дислокаций в температурном интервале 77–296 К. Ориентационная зависимость кривых «напряжение – деформация», коэффициента деформационного упрочнения $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ и пластичности определяется числом действующих систем скольжения или двойникования. В ориентации $[\bar{1}11]$ при развитии скольжения в нескольких системах, дефектов упаковки и двойникования при 77 К $\theta = d\sigma/d\varepsilon = 2330$ МПа имеет максимальное значение. В ориентации $[\bar{1}44]$ при развитии скольжения преимущественно в одной системе с $\theta = d\sigma/d\varepsilon = 670$ МПа максимальная пластичность 67% реализуется при температуре 296 К.

Ключевые слова: $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$ высокоэнтропийный сплав, монокристаллы, легирование азотом, планарная структура, двойникование, скольжение, разрушение.

Введение

Влияние легирования азотом от 0.5 до 3 ат.% на механические свойства, дислокационную структуру и механизм деформации (скольжение, двойникование) было исследовано на поликристаллах стабильных ГЦК- (ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка) высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1–5]. В поликристаллах стабильных ГЦК ВЭС легирование азотом концентрацией 0.5–3 ат.% сопровождалось ростом напряжений на пределе текучести $\sigma_{0.1}$ от 350 до 1000 МПа при 77 К и от 180 до 380 МПа при 296 К, соответственно, при содержании атомов азота от 0.5 до 2 ат.% [1]. Легирование азотом до 1 ат.% в поликристаллах CrFeMnCoNi и до 3 ат.% в $\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Co}_{20-x}\text{N}_x$ ($x = 1-3$ ат.%) ВЭС приводило к локализации деформации, развитию планарной структуры с плоскими скоплениями дислокаций и увеличению пластичности до 50–90% [1, 2]. Влияние азота на ГЦК–ГПУ-мартенситное превращение (МП) (ГПУ – гексагональная плотноупакованная решетка) было исследовано на Fe–Mn-сплавах [6–9]. Показано, что легирование азотом до 0.2 мас.% (0.2 мас.% $\approx$ 0.8 ат.%) подавляет ГЦК–ГПУ МП, стабилизирует ГЦК-фазу. При этом на температурной зависимости предела текучести $\sigma_{0.1}(T)$ температурный интервал для образования ГПУ-мартенсита под нагрузкой исчезал и зависимость $\sigma_{0.1}(T)$ приобретала вид, характерный для стабильных ГЦК-кристаллов при деформации скольжением [9]. Исследований влияния атомов азота на ГЦК–ГПУ МП в моно- и поликристаллах $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС к настоящему времени в литературе нет.

В настоящей работе на монокристаллах $(\text{CrFeMn})_{60}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{4.8}\text{N}_{0.2}$ (ат.%) ВЭС ставилась задача исследовать влияние малой концентрации атомов азота 0.2 ат.% на ГЦК–ГПУ МП и прочностные свойства ГЦК-фазы. Для исследования были выбраны две ориентации, $[\bar{1}11]$ и $[\bar{1}44]$, для развития под нагрузкой нескольких и одного варианта ГПУ-мартенсита соответственно [10].

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2024-0007.

Релаксационные процессы в природном пирите, происходящие под воздействием постоянных и переменных электрических полей

Н.П. Степанов^{1,2}, Г.И. Грабко¹

¹ Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

² Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Представлены результаты исследования отклика природного пирита FeS_2 на одиночные электрические импульсы постоянного и переменного напряжения различной амплитуды и длительности. Установлено, что, в отличие от импульсов постоянного напряжения, после которых удельное сопротивление образцов уменьшается пропорционально увеличению амплитуды напряжения, отклик на импульсы переменного напряжения характеризуется неоднозначной зависимостью величины уменьшения удельного сопротивления FeS_2 от амплитуды импульсов. Кроме того, если после импульса постоянного напряжения временная зависимость процесса восстановления подчиняется экспоненциальному закону, то в случае переменного напряжения – степенному. Обсуждаются возможные причины наблюдаемых эффектов и перспективы их практического использования.

Ключевые слова: пирит, импульс напряжения, удельное сопротивление, временная зависимость релаксационного процесса.

Введение

Одним из перспективных направлений развития современной электроники является термогенерация на основе альтернативных источников, преобразующих термическую энергию в электрическую [1–3]. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость поиска и комплексного изучения электрофизических свойств новых полупроводниковых соединений, соответствующих определенным требованиям: дешевизна, широкая распространенность в природе, химическая устойчивость, удовлетворительная способность к восстановлению собственных параметров после воздействия внешних факторов, таких как температура, постоянные, переменные электрические поля и т.д. Одними из таких минералов могут стать сульфиды, являющиеся объектом промышленной добычи и представляющие собой бинарные соединения серы с различными цветными металлами (CuS_2 , CoS_2 , NiS_2 и т.д.). При этом свойства сульфидов достаточно подробно изучены, информация о них представлена в различных монографиях [4–6].

Пирит FeS_2 является наиболее распространенным среди этих материалов. Известно, что в природе FeS_2 встречается в двух модификациях с n - и p -типом проводимости. Подвижность дырок в данном минерале при температуре 293 °С изменяется в пределах 0.5–3 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Такие значения подвижности характерны для локализованных носителей с большой эффективной массой. Подвижность электронов варьируется в интервале 10–50 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Низкие значения подвижности свидетельствуют о прыжковом типе проводимости пирита. Повышенный интерес именно к этому составу обусловлен еще и тем, что он представляет собой модельный объект для анализа структуры и физических свойств родственных материалов и, в частности, сульфидов на основе d -элементов VIII группы подгруппы железа. Согласно результатам работы [4], в которой была предложена ионная модель пирита $\text{Fe}^{2+}(\text{S}_2)^{2-}$, полианион $(\text{S}_2)^{2-}$ обладает целиком заполненными $3p\pi$ -орбиталями и пустой антисвязывающей $3\sigma^*$ -орбиталью. При этом, несмотря на потенциальную возможность присутствия результирующего молекулярного момента (что могло быть ожидаемо вследствие $3d^6$ конфигурации Fe и наличия четырех неспаренных спинов), было обнаружено равенство нулю данного параметра. По мнению авторов работы [4], последнее связано с тем, что три из пяти $3d$ -орбиталей целиком заполнены, а остальные две полностью свободны. И коль скоро взаимодействие между железом и серой достаточно сильно для того, чтобы обеспечить низкоспиновую конфигурацию ионов Fe^{2+} , оно, вероятно, приводит и к некоторой ковалентности связи. На это указывает и размер межъядерного расстояния (2.26 Å), которое значительно меньше суммы соответствующих ионных радиусов (2.60 Å). Ширина запрещенной зоны FeS_2 по данным различных источников колеблется в пределах от 0.7 до 1.2 эВ [4, 5, 7].

Методика расчета давления нанопузыря в воде

Ю.К. Левин¹

¹ Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрена методика расчета кулоновского давления P_C на границе заряженного нанопузыря в воде без солей. Учтено, что вода в электростатическом поле нанопузыря поляризуется и вокруг его заряда q_0 в воде наводится связанный заряд q_1 . Показано, что давление P_C имеет два слагаемых: за первое отвечает давление P_q суммы зарядов q_0 и q_1 в вакууме, а за второе – давление поляризованной воды P_p . Оба слагаемых положительны и увеличивают радиус нанопузыря. Причем последнее давление в $(\epsilon-1)$ раз больше первого. Также показана ошибочность некоторых мнений: давление P_C отрицательно, давление Лапласа P_L положительно, вода сжимает нанопузырь, либо вообще не давит на него.

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

Нанопузырям в воде посвящен ряд публикаций, в том числе [1–18]. Различают поверхностные нанопузыри (ПНП), неподвижно закрепленные на границе раздела твердой и жидкой сред, и объемные (ОНП) – подвижные. Нанопузырьковые технологии широко востребованы для решения проблем изменения климата, охраны окружающей среды, снижения затрат и энергопотребления в таких промышленных процессах, как флотация, аэрация и озонирование, которые способны устранять загрязняющие вещества и цвет, производить дезинфекцию воды и окисление органических загрязняющих веществ. Также с помощью ОНП решаются проблемы экологии, медицины/биомедицины, сельского хозяйства, оптимизации терапевтических и диагностических методов и других областей благодаря малому размеру, большой удельной площади поверхности, длительному времени пребывания в воде, высокой мощности массопереноса, высокому дзета-потенциалу [3] ОНП. Их применение при очистке коммерческих и бытовых сточных вод вместо ранее использовавшихся биологических подходов снижает затраты энергии, повышает эффективность, исключает дорогие химикаты и многоступенчатую обработку [4]. Для практического применения ОНП должны быть стабильными, т.е. иметь большие времена жизни. Различные механизмы обеспечения стабильности обсуждались в литературе [7–10, 16]. При гидродинамическом подходе с учетом возможной коалесценции соседних ОНП найдено, что газы, растворенные в электролите, ингибируют коалесценцию ОНП с учетом уменьшения силы притяжения между ними. Также, но в меньшей степени влияет градиент поверхностного натяжения при слиянии пузырьков (эффект Гиббса – Марангони) [7, 8]. Отмечалось влияние и гидратации ионов [9]. Самое широкое распространение получил электростатический подход [1, 7–16], при котором полагают, что стабильность ОНП обеспечивается равновесием действующих на границе ОНП кулоновского $P_C(r_0)$ [19] и лапласовского $P_L(r_0)$ [20] давлений:

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

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

где r_0 и q_0 – радиус и заряд ОНП; $\epsilon = 80$ – относительная диэлектрическая проницаемость (ОДП) воды; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\alpha = 0.072$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды; $W_C(r_0)$ – кулоновская энергия ОНП.

Давление газа внутри ОНП не учитывается, так как оно на порядки меньше давлений P_C и P_L во всем диапазоне размеров ОНП. Общепризнано, что давления P_C и P_L противоположно направлены и имеют разные знаки. Однако до сих пор нет единого мнения о знаке этих давлений. Согласно [17, 18], $P_L(r_0) > 0$ и, следовательно, $P_C(r_0) < 0$, но обратное доказано в [15, 19–22], что делает обсуждение этого вопроса актуальным.

Диэлектрические и тепловые свойства композитов на основе иодида диизопропиламмония и микрочастиц меди

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

¹ Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск, Россия

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

Приводятся результаты исследования композитных материалов на основе органического сегнетоэлектрика иодида диизопропиламмония (DIPAI) с частицами меди диаметром 1 мкм при объемной концентрации 2%. Проведен анализ температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и сигнала дифференциального термического анализа в диапазоне 300–400 К. Обнаружено, что введение медных частиц изменяет последовательность фазовых переходов, увеличивая температуру Кюри DIPAI.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, иодид диизопропиламмония, медь, композит, диэлектрическая проницаемость, фазовый переход.

Введение

Сегнетоэлектрические материалы, характеризующиеся наличием спонтанной поляризации P_s , изменяющейся под воздействием внешнего электрического поля, на протяжении более ста лет остаются в центре внимания исследователей в области конденсированного состояния вещества и материаловедения [1]. В ходе многолетних исследований было выявлено значительное количество соединений, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, среди которых представлены как неорганические, так и органические материалы. Наибольшее практическое применение на сегодняшний день получили неорганические сегнетоэлектрики, обладающие структурой типа перовскита. Их востребованность обусловлена высокой диэлектрической проницаемостью ϵ' , значительными значениями P_s , а также стабильностью физических характеристик в широком температурном диапазоне. Благодаря этим свойствам перовскитоподобные соединения находят применение в производстве конденсаторов, пьезоэлектрических сенсоров, термостатируемых переключателей и других устройств.

В последние годы значительно возрос интерес к органическим сегнетоэлектрикам, которые привлекают внимание благодаря своей экологической безопасности, технологической простоте обработки, биосовместимости и относительно низкой стоимости [2]. Эти материалы рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным неорганическим сегнетоэлектрикам, особенно в области гибкой электроники, биоэлектронных устройств и энергосберегающих технологий. Исследования в данном направлении направлены на поиск новых органических соединений с высокой стабильностью свойств, а также на разработку композитных материалов, объединяющих преимущества как органических, так и неорганических сегнетоэлектриков.

Среди органических соединений, демонстрирующих выраженные сегнетоэлектрические свойства, можно выделить кроконовую кислоту [3], диизопропиламмония хлорид [4] и бромид [5], поскольку их спонтанная поляризация и температура Кюри сопоставимы с аналогичными характеристиками классических неорганических сегнетоэлектриков. Особое внимание уделяется исследованиям иодида диизопропиламмония (DIPAI). Однако в научной литературе по поводу его сегнетоэлектрических свойств имеются противоречивые сведения [6, 7]. В частности, в исследовании [6] сообщается, что кристаллы DIPAI обладают спонтанной поляризацией порядка 33 мКл·см⁻². Это свидетельствует о выраженных сегнетоэлектрических свойствах этого соединения. В то же время в работе [7] полярное состояние в синтезированных образцах DIPAI зафиксировано не было, что может быть обусловлено различиями в методах получения и качества кристаллов.

Согласно более ранним экспериментальным данным [8], переход DIPAI в сегнетоэлектрическое состояние возможен только при нагревании выше 423 К. Данный фактор ограничивает его потенциальное применение в низкотемпературных устройствах, но может быть полезен в термостойких сегнетоэлектрических системах. Важно отметить, что свойства DIPAI, а также механизмы его фазовых переходов требуют дальнейших исследований, включая детальный анализ влияния кристаллохимической структуры, межмолекулярных взаимодействий и внешних факторов (давления, электрического поля) на сегнетоэлектрические свойства данного материала.

Полевая ионная микроскопия структурной модификации поверхности ЖС36-ВИ после бомбардировки Ar^+ (30 кэВ)

В.А. Ивченко¹

¹ *Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Представлены результаты модификации атомной структуры безуглеродистого монокристаллического сплава ЖС36-ВИ после бомбардировки пучками газовых ионов (Ar^+), ускоренными до 30 кэВ и флюенсом $F = 10^{17}$ ион/см². Методом полевой ионной микроскопии установлено, что атомная структура поверхности и приповерхностного объема в результате радиационного воздействия испытывает фазовые превращения с образованием новых фаз. Определены размер, форма и места залегания возникших фаз в объеме материала. Обнаружена глубина проникновения радиационного воздействия в приповерхностном слое. При использованных режимах облучения новые нанодисперсные фазы наблюдались вплоть до 30 нм приповерхностного объема сплава.

Ключевые слова: взаимодействие заряженных ионов с ЖС36-ВИ, полевая ионная микроскопия, атомная структура, нанофазы.

Введение

Одна из актуальных задач получения необходимой структуры поверхности вещества состоит в изучении взаимодействия пучков заряженных частиц с поверхностью материала на расстоянии $\sim 1\text{--}100$ нм от облученной поверхности. По сути, создание пленок или покрытий в этом размерном диапазоне радиационного воздействия.

В настоящей статье получены результаты исследований кристаллической структуры поверхности и приповерхностного объема безуглеродистого монокристаллического сплава ЖС36-ВИ [1] после радиационного воздействия. Лопатки из такого литого сплава используются в современных авиационных двигателях [2, 3].

Настоящая работа посвящена изучению модификации поверхности и приповерхностного объема сплава ЖС36-ВИ после бомбардировки пучками газовых ионов (Ar^+), ускоренными до 30 кэВ и флюенсом $F = 10^{17}$ ион/см². Одна из задач – экспериментальный анализ радиационных повреждений и возможных фазовых превращений в результате радиационного воздействия на сплав ЖС36-ВИ.

Для диагностики таких структур был выбран метод полевой ионной микроскопии (ПИМ). Возможности ПИМ позволяют изучать приповерхностный объем облученных материалов контролируемым удалением атомов с поверхности. Размер поля зрения микроскопа (порядка 100 нм) и анализ образца в объеме посредством управляемого удаления поверхностных атомов дает возможность проанализировать и установить модификацию атомной структуры. Изучение материала в объеме до микронных размеров дает гарантию и макромасштабного получения экспериментальных данных.

Применение методов атомно-зондовой томографии (Atom Probe Tomography, АРТ или 3D Atom Probe) и полевой ионной микроскопии позволяет получать уникальные результаты в различных областях физики конденсированного состояния, в частности, при исследовании жаропрочных никелевых сплавов [4–11].

Ранее [12] были получены результаты исследования кристаллической структуры безуглеродистого монокристаллического сплава ЖС36-ВИ в атомном масштабе.

1. Материал и методика исследований

В качестве материала для заготовок образцов использовали рабочую лопатку турбины высокого давления авиационного двигателя. Количественный химический состав предназначенного для облучения сплава ЖС36-ВИ представлен в [1]. Штабики размером 0.2×0.2 мм длиной 20 мм представляли собой заготовки, которые вырезали на электроискровом станке из материала лопатки. Для изготовления острийных образцов с радиусом кривизны вершины 30–50 нм использовали процессы электрохимического полирования.

О влиянии поля модуляции и частотного сдвига спинового взаимодействия на формирование сигналов поглощения и дисперсии ядерного магнитного резонанса при их регистрации в слабых полях

Р.В. Давыдов^{1,2,3}, А.А. Гольдберг¹, Д.С. Проводин¹, В.В. Давыдов^{1,4}, В.И. Дудкин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфедова, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены проблемы, возникающие при экспресс-контроле состояния конденсированной среды методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в слабом поле. Обоснованы преимущества использования модуляционной методики для регистрации сигнала ЯМР в слабом поле по сравнению с другими методами в малогабаритных ЯМР-измерителях. Отмечены сложности, возникающие при получении дополнительной информации об исследуемой среде с использованием зарегистрированных сигналов ЯМР и определены направления их решения. Рассмотрена задача формирования новых коэффициентов в уравнениях Блоха, учитывающих модуляцию постоянного магнитного поля B_0 и спин-спиновое взаимодействие в сдвиге резонансной частоты и в формировании намагниченности M . С использованием преобразований Вагнесса введены сигналы поглощения $\nu(t)$ и дисперсии $u(t)$ и осуществлен переход во вращающуюся систему координат и сформировано уравнение Блоха для компонент $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' с новыми коэффициентами. Представлено математическое соотношение для описания формы регистрируемого сигнала ЯМР, который на выходе автодинного детектора состоит из сигналов $\nu(t)$ и $u(t)$ в различной пропорции между ними в зависимости от условий его регистрации. Для различных параметров магнитных полей выполнен расчет значений $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' . Проведено сравнение различных вариантов этих расчетов, которое позволило обоснованно исключить одного из новых коэффициентов для уравнений Блоха вклад поля модуляции, изменяющийся во времени. Разработано решение системы уравнений Блоха с новыми коэффициентами и получены соотношения для $\nu(t)$, $u(t)$ и M_z' , в которых эти сигналы выражены только через параметры магнитных полей и времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации исследуемой среды. Выполнен расчет форм линий с использованием параметров, регистрируемых сигналов ЯМР с использованием модуляционной методики, и проведено их сравнение с экспериментальными данными. Полученные результаты подтвердили обоснованность выбранного подхода к описанию новых коэффициентов и к решению системы уравнений Блоха, в которую они вошли, относительно $u(t)$, $\nu(t)$ и M_z' . Все это позволяет, в отличие от решений уравнений Блоха, которые были ранее, продолжить вывод аналитических соотношений для сигналов дисперсии $u(t)$ и поглощения $\nu(t)$ независимо друг от друга и определять для них критические точки, а также характер изменения самих зависимостей, что ранее сделать было невозможно.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, уравнения Блоха, конденсированная среда, магнитное поле, зависящие от времени коэффициенты в уравнениях Блоха, сигнал ЯМР, модуляционная методика, взаимодействие спинов, время продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации.

Введение

В современном мире повышенное внимание уделяется развитию методов экспресс-контроля конденсированных сред для обеспечения решения большого числа задач в различных областях науки, промышленности, медицине, экологии и сельском хозяйстве [1–4]. Наибольшее предпочтение среди них получили бесконтактные методы, в которых проводимые измерения не изменяют физическую структуру и химический состав исследуемой среды [1, 3–7]. Среди этих методов многие ученые и инженеры предпочтение отдают измерениям, основанным на явлении рефракции и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [4, 7–12].

Малогабаритные ЯМР-релаксометры, в отличие от данного типа рефрактометров, позволяют, кроме определения по измеренным значениям времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации состояния среды (соответствует стандартному или нет), регистрировать сигнал ЯМР, в котором заложена дополнительная информация об исследуемой среде [1, 2, 4, 7, 13–15]. Данный сигнал ЯМР (в форме затухающих непериодических колебаний «виглей») при экспресс-контроле можно получить только в случае использования для его регистрации модуляционной методики [1, 4, 11–13, 15–17]. Принцип регистрации сигнала ЯМР с использованием данной методики основан на быстром прохождении резонансных условий в магнитном поле B_0 в контуре регистрации автодинно-

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 535.39

DOI: 10.17223/00213411/68/7/10

**Высокоизбирательный полосно-пропускающий фильтр
для входного мультиплексора спутниковой связи С-диапазона***

Б.А. Беляев^{1,2}, А.М. Сержантов^{1,2}, Я.Ф. Бальва³, А.А. Лексиков³,
С.Д. Крёков^{2,3}, К.И. Поминов³, И.Е. Бурлаков^{2,3}

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия

Канальный полосно-пропускающий фильтр мультиплексора спутниковой связи разработан на конструкции, состоящей из двенадцати коаксиальных резонаторов. Для уменьшения группового времени запаздывания и существенного повышения избирательности устройства использованы две дополнительные индуктивные и две дополнительные емкостные связи между несмежными резонаторами. Это позволяет расположить по два полюса затухания справа и слева вблизи полосы пропускания. Для уменьшения неравномерности в полосе пропускания коэффициента передачи применялся специальный метод, заключающийся в некотором уменьшении потерь на отражение вблизи краев полосы пропускания фильтра. Это позволило с использованием электродинамического анализа 3D-модели разработанной конструкции синтезировать миниатюрный фильтр с центральной частотой полосы пропускания $f_0 = 4$ ГГц и ее шириной $\Delta f = 45$ МГц по уровню 0.8 дБ от уровня минимальных потерь. При этом измеренные характеристики изготовленного опытного образца фильтра показали хорошее согласие с рассчитанными.

Ключевые слова: коаксиальный резонатор, полосно-пропускающий фильтр, матрица связи, дополнительная связь.

Введение

Как известно, одной из важнейших проблем, существующих при создании спутниковых систем связи, является разделение близко расположенных каналов передачи информации. Для решения этой проблемы создаются мультиплексоры на основе высокоизбирательных СВЧ-фильтров с узкими полосами пропускания и высокой крутизной склонов амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) [1, 2]. Главные требования, предъявляемые к таким устройствам, – небольшие габариты и масса, малая неравномерность АЧХ и группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания. Кроме того, при изменении температуры должна обеспечиваться высокая стабильность основных характеристик фильтров.

Традиционно каналные фильтры спутниковых мультиплексоров реализуются на основе волноводных резонаторов, представляющих собой отрезки полых волноводов прямоугольного [3] или круглого сечения [4]. Такие резонаторы на частотах выше 10 ГГц имеют небольшие размеры при достаточно высокой собственной добротности. Например, в Ку-диапазоне для моды H_{10} собственная добротность резонатора, выполненного из отрезка полого волновода прямоугольного сечения, может достигать $Q_0 = 7 \cdot 10^3$ [5]. Однако на частотах С-диапазона (3.4–8.0 ГГц) резонаторы на основе полых волноводов имеют неприемлемо большие размеры, что не позволяет создавать на их основе устройства с небольшими габаритами и массой для спутниковых систем связи. Одним из возможных путей решения данной проблемы является применение резонаторов на основе отрезков коаксиальной линии передачи. В настоящей работе разработана новая конструкция полосно-пропускающего фильтра двенадцатого порядка на основе четвертьволновых коаксиальных резонаторов с воздушным заполнением.

* Работа выполнена в рамках целевого финансирования (гранта) № 308 от 18.12.24 г. между ФИЦ КНЦ СО РАН, Краевым фондом науки и АО «РЕШЕТНЕВ».

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592

DOI: 10.17223/00213411/68/7/11

**Моделирование димеризации атомов
на поверхности структурированных подложек Si***П.Л. Новиков^{1,2}, К.В. Павский^{1,3}, П.Н. Цынк^{1,2}¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия³ Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия

Методом молекулярной динамики проведено моделирование процесса димеризации атомов на стенках ямок в структурированных подложках Si. Обнаружено, что микроскопический механизм эпитаксиального роста Ge на структурированных подложках Si обусловлен образованием Н-образных атомных конфигураций, включающих 2 атома димера и 4 атома в подлежащем атомном слое.

Ключевые слова: моделирование, метод молекулярной динамики, димеризация, структурированные подложки.

Введение

Гетероэпитаксиальный рост массивов 3-мерных nanoостровков привлекает интерес исследователей из-за возможности применений в электронных и оптоэлектронных приборах и устройствах следующего поколения [1–3]. Дополнительные возможности представляют пространственно-упорядоченные массивы квантовых точек (КТ), на основе которых могут быть созданы светодиодные матрицы, спинтронная память и логические элементы для квантового компьютера [4]. Для формирования таких массивов были предложены структурированные подложки с периодическим рисунком из мелких ямок, полученных с помощью литографии [5]. Ямки действуют как ловушки для осаждаемых атомов, в результате 3-мерные nanoостровки зарождаются в заданных позициях.

Несмотря на длительное время, прошедшее после появления концепции структурированных подложек, механизмы атомной диффузии и зарождения 3-мерных nanoостровков в ямках недостаточно полно изучены. В частности, затруднен контролируемый рост nanoостровков в ямках размером менее 50 нм, что ограничивает возможность создания сверхплотных массивов КТ. Элементарные процессы, сопровождающие рост в ямках, невозможно непосредственно наблюдать экспериментальными методами. В этом отношении исключительную роль приобретают методы моделирования [6, 7], позволяющие дать научное знание о механизме роста на микроскопическом уровне и на временных интервалах от единиц до сотен пикосекунд.

В данной работе методом молекулярной динамики (МД) исследуются процессы димеризации на поверхности структурированных подложек Si на стадии осаждения смачивающего слоя Ge. Особое внимание уделено выявлению тех атомных конфигураций на димеризованной поверхности стенок ямок, которые воспроизводятся при осаждении каждого нового атомного слоя, обуславливая эпитаксиальный характер роста.

1. Методы и подходы

Моделирование, применяемое в данной работе для исследования процессов на стенках ямок, проводилось методом МД. Этот метод состоит в численном решении классической динамической задачи в системе, содержащей большое ($\sim 100 \cdot 10^3$) число атомов. Взаимодействие между атомами описывается эмпирическим потенциалом Терсоффа [8], представляющим собой функцию координат атомов. Результаты моделирования МД формируют наборы конфигураций, подчиняющиеся статистическому распределению в микроканоническом ансамбле. Метод МД предоставляет детальную информацию о свойствах системы на микроскопическом уровне и в пикосекундных вре-

* Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWGW-2022-0011).

Влияние прямоугольных алюминиевых наноантенн на оптическое излучение множественных квантовых ям GeSiSn/Si^{*}

С.А. Хахулин¹, Д.В. Коляда¹, Д.Д. Фирсов¹, О.С. Комков¹, В.А. Тимофеев²,
И.В. Скворцов², В.И. Машанов², А.Е. Гайдук², Д.Е. Уткин^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
г. Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Методами ИК-фурье-спектроскопии отражения и анизотропного отражения определены спектральные положения локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массивах алюминиевых наноантенн прямоугольной формы, сформированных на поверхности излучающих гетероструктур с квантовыми ямами GeSiSn/Si. Показано, что взаимодействие наноантенн с оптическим излучением GeSiSn/Si приводит к его частичной поляризации. Также продемонстрировано усиление интенсивности фотолюминесценции гетероструктур, которое зависит от спектрального совпадения диапазонов излучения множественных квантовых ям и локализованного поверхностного плазмонного резонанса в наноантеннах.

Ключевые слова: гетероструктуры, локализованный поверхностный плазмонный резонанс, GeSiSn, фурье-спектроскопия, отражение, анизотропное отражение, фотолюминесценция.

Введение

Разработка оптических устройств на основе кремниевой технологии является перспективным направлением, способным значительно увеличить скорость вычислительных систем, основанных на кремнии [1]. Поскольку подавляющее большинство массовой микроэлектроники производится с использованием кремниевых технологий, интеграция фотонных компонентов на кремниевой платформе является актуальной задачей.

Одним из перспективных материалов для создания оптических систем на основе кремниевой технологии является твердый раствор GeSiSn, являющийся прямозонным при определенных составах [2]. Технология выращивания высококачественных гетероструктур на основе GeSiSn в настоящее время активно развивается, что делает данный материал удобным для его практического применения [3–5].

Увеличение фоточувствительности различных приборных прототипов на основе гетероструктур и управление их излучающими свойствами возможно благодаря использованию плазмонных металлических наноантенн, формируемых на поверхности таких структур [6]. Под воздействием электромагнитного излучения свободные электроны в металлических наночастицах приобретают коллективное колебание, что при определенной энергии приводит к появлению в наночастицах локализованного поверхностного плазмонного резонанса (localized surface plasmon resonance – LSPR). В результате такого резонанса вблизи наночастиц появляется сильное электрическое поле, что широко используется для усиления комбинационного рассеяния, ускорения химических реакций и т.д. [7]. Такие частицы также называются оптическими наноантеннами, поскольку при помощи них можно в разы усиливать слабые оптические сигналы [6]. Это свойство позволяет управлять оптическим излучением, достигая необходимого уровня его интенсивности.

Цель данной работы – исследование оптических свойств гибридной системы, включающей излучающие множественные квантовые ямы GeSiSn/Si и алюминиевые оптические наноантенны прямоугольной формы, сопряженные с гетероструктурой.

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.534

DOI: 10.17223/00213411/68/7/13

**Влияние атомов поверхности грани (001) Au
на коэффициент ионного распыления:
сравнение с теорией Зигмунда**А.И. Мусин^{1,2}, В.Н. Самойлов³¹ Вятский государственный университет, г. Киров, Россия² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Исследовано влияние атомов поверхности грани (001) Au на коэффициент распыления. Показано, что чем большее количество атомов окружения возле эмитируемого атома учитывается, тем выше коэффициент распыления по сравнению с предсказанием классической теории распыления Зигмунда. Увеличение вероятности распыления и коэффициента распыления на ~ 40% связано с увеличением числа рассеивающих центров, на которых происходит рассеяние эмитируемого атома с отклонением в сторону нормали к поверхности, вследствие этого возрастает число распыленных эмитируемых атомов, преодолевших плоский потенциальный барьер. Результат показывает, что эффект надповерхностного рассеяния вносит значительный вклад в распыление.

Ключевые слова: ионное распыление, теория Зигмунда, поверхностные модели распыления, молекулярная динамика, коэффициент распыления, плоский потенциальный барьер.

Падение ускоренных ионов на поверхность твердого тела вызывает ионное распыление, которое количественно характеризуется коэффициентом распыления Y , равным отношению числа распыленных атомов к числу упавших ионов. На основе уравнений переноса П. Зигмундом была создана теория распыления для аморфных и поликристаллических мишеней [1], в рамках которой можно вычислить Y .

В теории Зигмунда последняя стадия распыления, на которой происходит эмиссия атома с поверхности кристалла, описывается исключительно с помощью потенциального барьера, при пересечении которого преобразовываются энергия и импульс атома. Однако это описание является слишком упрощенным, поскольку не учитываются затраты энергии при рассеянии на соседних атомах поверхности (которые могут превышать энергию связи [2]) и отклонение эмитируемого атома в направлении нормали к поверхности за счет такого рассеяния.

Пусть E_0 , θ_0 , φ_0 – начальная энергия, полярный и азимутальный углы вылета эмитируемого атома при пересечении им поверхности кристалла, E , θ , φ – энергия, полярный и азимутальный углы наблюдения атома (на бесконечности). Если потенциальный барьер является плоским, то в теории Зигмунда будет:

$$E = E_0 - E_b,$$
$$\cos \theta = \sqrt{\frac{E_0 \cos^2 \theta_0 - E_b}{E_0 - E_b}},$$
$$\varphi = \varphi_0.$$

Однако при учете дискретной поверхности кристалла энергия и углы меняются более сложным образом.

В настоящей работе была рассмотрена эмиссия атомов с поверхности грани (001) Au, имеющего ГЦК-структуру, с помощью 4 моделей, аналогичным модели из [3]. Атомы эмитировались только в азимутальном направлении $\langle 010 \rangle$ на центр линзы из двух ближайших атомов поверхности, с начальными энергиями E_0 от 0.5 до 100 эВ с шагом 0.01 эВ, с полярными углами θ_0 от 0° до 90° с шагом $1/450$ по $\cos \theta_0$ – около 4.5 млн испытаний.

Расчет траекторий эмитированных атомов происходил с помощью метода молекулярной динамики (МД). Взаимодействие эмитируемого атома с атомами окружения описывалось отталкивающим потенциалом Борна – Майера. Притяжение эмитируемого атома к поверхности описывалось плоским потенциальным барьером высоты $E_b = 3.78$ эВ. Атомы, преодолевшие потенциальный барьер, считались распыленными.

Модель I содержала, кроме эмитируемого атома, 4 ближайших атома первого слоя, в модели II к 4 ближайшим атомам первого слоя добавлялись 4 ближайших атома второго слоя (итого 8 атомов окружения). Модель III содержала 20 атомов окружения из первого слоя, как в [3], в модели IV число атомов окружения

Ежемесячный научный журнал

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА
IZVESTIYA VUZOV. FIZIKA

2025. Т. 68. № 7

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 02.07.2025. Выпуск в свет 31.07.2025. Заказ № 6396.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.
Усл. п. л. 12.32. Уч.-изд. л. 13.80. 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

