

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ФИЗИКА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с января 1958 г.

Том 66

Февраль, 2023

№ 2 (783)

СОДЕРЖАНИЕ

Физика магнитных явлений

- Бадьин А.В., Кулешов Г.Е., Вагнер Д.В., Дорожкин К.В., Бердюгин А.И., Сусляев В.И., Карева К.В.
Электрофизические свойства полимерного композиционного материала на основе гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ для
применения в аддитивной технологии.....3

Физика полупроводников и диэлектриков

- Хлудков С.С., Прудаев И.А., Толбанов О.П., Ивонин И.В. Арсенид галлия с включениями ферромагнитных
 MnAs нанокластеров в качестве материала для спинтроники. Ч. 214
- Лебедев С.М., Гейфе О.С. Диэлектрические свойства многофазных композитов на основе полилактида23
- Давыдов В.Н., Задорожный О.Ф. Резистивное профилирование как метод исследования гетероструктур
с множественными квантовыми ямами.....32

Теплофизика и гидродинамика

- Мусихин А.Ю., Зубарев А.Ю. К теории магнитоиндуцированных течений в тромбированных каналах41

Физика элементарных частиц и теория поля

- Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В. Выявление аномалий в первой конечной разности компонент
электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах гравитационного излучения РДЗС50
- Абдуллаев С.К., Годжаев М.Ш., Гулаева А.К. Рождение и распад хиггс-бозонов в мюонных коллайдерах. Ч. I59
- Тарвердиева В.А. Аналитическое решение уравнения Клейна – Фока – Гордона для суммы потенциала Морзе
и кольцеобразного потенциала69

Оптика и спектроскопия

- Томилин Ф.Н., Мельчакова Ю.А., Артюшенко П.В., Рогова А.В., Аврамов П.В. Атомная и электронная
структура и квантовый конфайнмент в нанокристаллитах кремния. Часть I. Нанокристаллы кремния,
погруженные в матрицу оксида кремния.....77
- Игошина С.Е., Лыков Е.А., Якушова Н.Д., Карманов А.А., Пронин И.А. Спектроскопические исследования
самосборки фрактальных нанообъектов в золь-гель-наносистемах под действием УФ-излучения84
- Белибихин С.В., Конобеева Н.Н., Белоненко М.Б. Особенности распространения предельно коротких
оптических импульсов в углеродных нанотрубках с учетом многофотонного поглощения92
- Степанова У.А., Мурадова А.Г., Аль-Майяхи Х., Тельминов Е.Н., Хакимов К.Т., Солодова Т.А., Самсонова Л.Г.,
Гадиров Р.М. Разработка тонкопленочных нанокомпозитов на основе ПММА и квантовых точек состава
 CdSe/CdS , CdSe/ZnS 97
- Азаматов З.Т., Йулдошев М.А., Базарбаев Н.Н. Влияние гамма-облучения на оптические свойства кристаллов
ниобата лития и $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$106

Физика конденсированного состояния

- Батуев С.П., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Ищенко А.Н., Радченко А.В., Радченко П.А., Саммель А.Ю.,
Степанов Е.Ю., Чупашев А.В. Экспериментально-теоретические исследования взаимодействия суперкавити-
рующих ударников с подводными разнесенными преградами113
- Фахрутдинова Е.Д., Харламова Т.С., Реутова О.А., Голубовская А.Г., Светличный В.А., Водянкина О.В.
Формирование композитных материалов на основе оксидов церия и марганца при лазерном синтезе.....118

Марченко Е.С., Байгонакова Г.А., Ясенчук Ю.Ф., Дубовиков К.М. Влияние термообработки на механические характеристики и мартенситные превращения пористого NiTi.....	125
Борисова С.Д., Русина Г.Г. Структурная релаксация и колебательные свойства системы 1.2 монослоя Li/Cu(111).....	133

Краткие сообщения

Булгакова М.В., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Интерференционное усиление черенковского излучения релятивистских частиц в тонких мишенях при косом влете	139
Эшкабилов Н.Б., Курбаниязов А.С. Выбор оптимальной схемы возбуждения и ионизации лантаноидов лазерным излучением.....	142

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.622.6

DOI: 10.17223/00213411/66/2/3

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТА $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ***

А.В. Бадьин, Г.Е. Кулешов, Д.В. Вагнер, К.В. Дорожкин,
А.И. Бердюгин, В.И. Сусяев, К.В. Карева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Приведены результаты исследования электрофизических свойств композиционного материала, содержащего гексаферрит $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ в полимерной матрице из акрилонитрилстиролакрилата. Представлены результаты рентгеновской и лазерной дифрактометрии исходных порошков гексаферрита, кривая намагниченности. Измерения электромагнитного отклика от материала проводились квазиоптическим методом в диапазоне частот 34–180 ГГц. На частоте порядка 49 ГГц обнаружена область избирательного поглощения, обусловленная естественным ферромагнитным резонансом.

Ключевые слова: электрофизические свойства, полимерные композиты, аддитивная технология, коэффициент прохождения, ферромагнитный резонанс.

Введение

В последние годы наблюдается стремительное развитие систем спутниковой и беспроводной связи (5G, 6G, Wi-Fi 7), IoT-устройств, геолокации, робототехники, телеметрии, систем дистанционного контроля и управления, медицинской, научной и бытовой электроники. При этом отмечается тенденция к увеличению рабочих частот современных электронных устройств вплоть до верхних частот микроволнового диапазона [1–3]. В результате возникает потребность в новых материалах, эффективно взаимодействующих с электромагнитным излучением не только на СВЧ, но и на КВЧ. Поэтому изготовление новых высокочастотных функциональных радиоматериалов, необходимых для дальнейшего развития радиоэлектронной техники, и исследование их электромагнитных характеристик являются актуальными задачами.

Отмечается также активность в разработке и применении аддитивных технологий для изготовления элементов радиоэлектронных устройств [4–6], которые имеют ряд преимуществ по сравнению с классическими субтрактивными.

Прежде всего, они позволяют уменьшать число технологических операций, снизить материалоемкость, обеспечить безотходность производства, повысить технологичность за счет разработки и оптимизации изделий в инженерных CAD-программах. Важным условием успешного применения аддитивных технологий является наличие материалов, сочетающих требуемые электромагнитные характеристики и возможность использования для 3D-принтера [7].

За последние десять лет практически на два порядка возросло число публикаций, посвященных разработке и исследованию полимерных функциональных материалов для аддитивных технологий [8–10]. В большинстве работ в качестве активной фазы для создания полимерных композитов используются традиционные радиоматериалы [7]. Так, при разработке проводящих полимеров для 3D-печати в качестве наполнителей в основном используются различные углеродные структуры: одностенные [11, 12] и многостенные углеродные нанотрубки [13–15], углеродные волокна [16], графены [17, 18], технический углерод [19, 20]. Гораздо реже в проводящих полимерах применяются порошки хорошо проводящих металлов, таких как медь [6], серебро [21] и алюминий [22]. Для создания магнитных полимерных композиционных материалов для аддитивной технологии в качестве активной фазы выступают сплавы ферромагнитных металлов [23], карбонильное

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22.29.20248, <https://rscf.ru/project/22.29.20248/> и средств Администрации Томской области.

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.382.2

DOI: 10.17223/00213411/66/2/14

**АРСЕНИД ГАЛЛИЯ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ MnAs
НАНОКЛАСТЕРОВ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ СПИНТРОНИКИ. Ч. 2**

С.С. Хлудков, И.А. Прудаев, О.П. Толбанов, И.В. Ивонин

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Представлен обзор работ по магнитным свойствам арсенида галлия, легированного марганцем (GaMnAs), с включениями нанокластеров. Экспериментальные исследования однозначно показали, что GaMnAs с включениями нанокластеров обладает ферромагнитными свойствами с температурой Кюри 350–360 К, что значительно выше, чем у разбавленного магнитного полупроводника GaMnAs, содержащего однородно распределенные атомы марганца. Ферромагнитные свойства таких структур обусловлены включениями нанокластеров MnAs в матрице GaAs. Показано, что GaMnAs с включениями MnAs является перспективным материалом для изготовления устройств спинтроники.

Ключевые слова: *арсенида галлия, нанокластеры, магнитные свойства, температура Кюри.*

Введение

Разбавленные магнитные полупроводники (DMS) привлекают внимание исследователей как материал для создания приборов спинтроники. Наиболее изученным из DMS является GaAs, легированный марганцем (GaMnAs). Температура Кюри DMS GaMnAs невысока, составляет около 200 К. Однако в последнее время появились работы по созданию методов изготовления GaMnAs с включениями частиц второй фазы, который имеет температуру Кюри выше комнатной. При этом показано, что свойства структур GaMnAs могут изменяться в широких пределах за счет изменения размеров, формы и распределения включений в матрице. Рассмотрены структуры, полученные разными методами, и возможности их использования для создания приборов спинтроники.

В данной части обзора рассмотрены магнитные свойства структур GaMnAs с включениями кластеров MnAs, полученных методом металлоорганической газофазовой эпитаксии (MOVPE), а также в процессе селективного MOVPE-роста. Приведены данные по гальвано-магнитным свойствам структур GaMnAs/MnAs и сведения о магнетоэлектронных приборах на основе GaMnAs с включениями кластеров MnAs.

**1. Получение GaMnAs с нанокластерами
методом металлоорганической газофазовой эпитаксии**

Гибридные структуры GaMnAs/MnAs получают молекулярно-лучевой эпитаксией GaAs и имплантацией марганца в GaAs с последующим отжигом, что изложено в первой части обзора. Этому способствует высокая температура (500–600 °C), типичная для метода MOVPE, и условия роста (отношение Mn/Ga в реакторе) [1–3]. В результате в матрице GaAs образуются нанокластеры MnAs. Они, как правило, имеют гексагональную структуру и располагаются вблизи поверхности выращенного слоя [3–5].

При высокой температуре (около 600 °C) и отношении Mn/Ga менее 8% происходит рост DMS $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ с однородным распределением атомов Mn. При большем отношении Mn/Ga растут гибридные структуры GaMnAs/MnAs, содержащие сравнительно большие нанокластеры MnAs – от 50 до 200 нм [1, 3, 6, 7]. При этом средняя концентрация Mn невысока – около 0.5%, что соответствует пределу растворимости Mn в GaAs при данной температуре роста [4, 7]. Если при выращивании структур методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии (LT MBE) с последующим отжигом нанокластеры имеют сферическую форму, то в процессе MOVPE – преимущественно линзообразную [5]. При этом их размер зависит от толщины слоев.

В тонких слоях (около 150 нм) типичные размеры включений составляют около 15 и 35 нм параллельно и перпендикулярно поверхности соответственно. При больших толщинах слоев

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

С.М. Лебедев, О.С. Гефле

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Двухфазные (полилактид/титанат бария (ПЛА/ BaTiO_3)) и трехфазные (ПЛА/ BaTiO_3 /углеродные нанотрубки (ПЛА/ BaTiO_3 /УНТ)) композиты были изготовлены по технологии компаундирования в расплаве. Диэлектрические свойства разработанных композитов измерялись методом диэлектрической спектроскопии в частотном ходе в диапазоне частот от 0.1 Гц до 1 МГц при различных температурах. Результаты экспериментов показали, что добавление небольшого количества УНТ (0.05 мас.%) в композиты ПЛА/ BaTiO_3 позволяет увеличить действительную составляющую диэлектрической проницаемости более чем в 40 и 20 раз по сравнению с таковыми как для исходного ПЛА, так и для двухфазного композита ПЛА/ BaTiO_3 соответственно при том же содержании сегнетоэлектрического наполнителя. Разработанные сегнетоэлектрические композиты могут найти широкое применение в различных областях промышленности, аддитивных технологиях и регенеративной медицине.

Ключевые слова: полилактид, титанат бария, углеродные нанотрубки, сегнетоэлектрические полимерные композиты.

Введение

Новые композиционные полимерные материалы (КПМ) с сегнето- и пьезоэлектрическими свойствами широко используются в различных приложениях, таких как конденсаторы с высокой запасаемой энергией [1, 2], экранирование от электромагнитных помех [3], антистатические покрытия [4], ультразвуковые преобразователи и датчики в интеллектуальных системах [5], и биомедицине [6–8].

Эти КПМ состоят из сегнетоэлектрического керамического наполнителя с высокой диэлектрической проницаемостью, диспергированного в полимерной матрице. Однако наличие большого количества границ раздела между частицами наполнителя и полимерной матрицей способствует к образованию на этих границах двойного электрического слоя [9, 10] и наличию различных видов релаксационной поляризации, что приводит к слабому межфазному взаимодействию между частицами наполнителя и полимерной матрицей. Кроме того, эти электроактивные сегнетоэлектрические наполнители сами обладают доменной поляризацией, которая обуславливает наличие дополнительных диэлектрических потерь в электрическом поле в определенном частотном диапазоне.

Для значительного увеличения диэлектрической проницаемости таких двухфазных композитов (достижения «диэлектрического» порога перколяции) возможны два пути: либо содержание керамического наполнителя должно быть более 50 об.%, либо частицы наполнителя должны подвергаться дополнительной химической обработке поверхности. Однако первый из них приводит к ухудшению реологических свойств композитов и невозможности их обработки методом экструзии, а второй – к ухудшению свойств наполнителя.

Для улучшения межфазного взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей авторы работ [11–14] предложили применение трехфазных композитов с добавлением небольшого количества углеродных нанотрубок (УНТ). Это позволяет значительно увеличить диэлектрическую проницаемость таких композитов примерно в 20 раз по сравнению с двухфазными [14]. Отличительной особенностью таких КПМ является появление значительной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот из-за наличия различных видов поляризации, таких как Максвелла – Вагнера, дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная и доменная.

Изучению этих проблем в литературе посвящено сравнительно немного работ, хотя именно частотные зависимости диэлектрических свойств лежат в основе разработки таких многофазных сегнетоэлектрических КПМ.

Попытки связать состав, структуру и свойства двух- и трехфазных полимерных композитов, наполненных титанатом бария (BaTiO_3), с их диэлектрическими свойствами были предприняты Дангом и др. [11], Ли и др. [15] и Хаммами и др. [16]. Однако эти попытки были не очень корректны с точки зрения объяснения полученных экспериментальных данных. Так, при интерпретации графиков Коула – Коула для трехфазных композитов поливинилиденфторид/многостенные углеродные

РЕЗИСТИВНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

В.Н. Давыдов, О.Ф. Задорожный

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Предложен метод вычисления профиля концентрации носителей заряда в гетероструктуре с квантовыми ямами, основанный на измерении полевой зависимости резистивных свойств гетероструктуры. Предполагается, что данный метод более информативен, чем метод емкостного профилирования, за счет как более широкого диапазона регистрируемых им частот перезарядки электронных состояний в p - n -переходе, так и более высокой чувствительности резистивных свойств гетероструктуры к изменению напряжения. Получено аналитическое выражение, позволяющее вычислить профиль концентрации по резистивному методу, наглядно демонстрирующее возможность появления пиков в профиле концентрации электронов. Экспериментальные исследования гетероструктур из InGaN/GaN показали работоспособность метода и его возможности в сравнении с методом емкостного профилирования.

Ключевые слова: гетероструктура, квантовые ямы, резистивное профилирование, емкостное профилирование.

Введение

Производство и совершенствование оптоэлектронных приборов на основе гетероструктур (ГС), содержащих квантовые ямы (КЯ), стимулирует развитие методов их анализа. В настоящее время для этих целей наиболее используемым методом является модификация метода профилирования легирующей примеси в p - n -переходе, основанная на дифференцировании его вольт-фарадной характеристики (ВФХ). С его помощью удастся определить профиль концентрации носителей заряда в обедненной части p - n -перехода с КЯ. Развитием данного подхода является разработка совместного решения уравнений Пуассона и Шредингера, в результате которого находятся численные значения ряда параметров ГС, определяющих ее энергетическую диаграмму. Сильными сторонами метода емкостного профилирования является использование наработанных методологической и аппаратной баз метода емкостной спектроскопии 3D-полупроводниковых структур, а также, в виду технической простоты в сравнении с электронно-зондовыми методами и высокой точности измерений, возможность изучения нанобъектов данным методом широким кругом исследователей [1–4].

Однако данный метод имеет ограничения на объем получаемой информации, связанные с принципиально высокой частотой тестового сигнала при измерении ВФХ, которые не «видят» медленно протекающие процессы структурной перестройки, перезарядки медленных состояний в ГС и т.д. Для получения информации о структурном совершенстве, доминирующих процессах электронно-дырочной подсистемы в КЯ, ее генерационно-рекомбинационных и деградационных свойствах структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) предпочтителен метод, основанный на анализе резистивных свойств ГС, определяемых из ее низкочастотной вольт-сиemensной характеристики (ВСХ) [5]. Полезность такого подхода продемонстрирована при исследовании поверхностно-барьерных структур [6, 7].

Следует отметить еще одно обстоятельство, указывающее на потенциально более высокую чувствительность операции профилирования по резистивным свойствам ГС с КЯ, – это более сильная экспоненциальная зависимость дифференциального сопротивления p - n -перехода от напряжения смещения по сравнению с корневой зависимостью емкости в емкостном профилировании.

Для развития указанного направления исследования 2D-объектов необходимо понимать, как формируются резистивные свойства ГС с МКЯ, что в первом приближении возможно на основе ее эквивалентной схемы. В настоящее время в литературе имеются отдельные данные о применении резистивного метода в электрофизической и фотоэлектрической модификации для исследования свойств ГС с 2D-объектами [8–10]. Однако его целенаправленное применение для исследования ГС с МКЯ практически не проводилось.

В работах [5, 11, 12] предложена эквивалентная схема (ЭС) ГС с МКЯ, в которой учтены резистивные и емкостные свойства p - n -перехода, МКЯ, условия поставки носителей заряда в КЯ.

ТЕПЛОФИЗИКА И ГИДРОДИНАМИКА

УДК 532.5

DOI: 10.17223/00213411/66/2/41

К ТЕОРИИ МАГНИТОИНДУЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ТРОМБИРОВАННЫХ КАНАЛАХ*

А.Ю. Мусихин, А.Ю. Зубарев

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*

Предложена теоретическая модель течений, индуцируемых бегущим магнитным полем в канале, заполненном немагнитной жидкостью и внедренной в нее каплей феррожидкости. Один конец канала предполагается закрытым (тромбированным). Разработан алгоритм асимптотического решения дифференциальных уравнений модели, в результате которого была вычислена скорость этих течений.

Ключевые слова: магнитная жидкость, осциллирующий магнитный поток, поле-индуцированный поток, тромбоз.

Введение

Тромбирование кровеносных сосудов является тяжелым и трудноизлечимым заболеванием, нередко приводящим к летальным исходам. Основным методом лечения тромбозов является инъекция специальных лекарств (тромболитиков) для растворения тромбов и восстановления кровотока. Однако в тромбированном кровеносном сосуде с остановившимся кровотоком распространение тромболитиков возможно только диффузионным, т.е. медленным и малоэффективным способом. Перспективный метод решения этой проблемы был предложен и запатентован в [1, 2]. Основная идея этого метода состоит в инъецировании в тромбированный кровеносный сосуд капли растворимой феррожидкости с наноразмерными магнитными частицами и в воздействии на это место переменного магнитного поля, создаваемого внешними электромагнитами. Под действием этого поля частицы приходят во вращательное и поступательное движение, передающееся несущей жидкости. В результате в кровеносном сосуде возникают циркуляционные течения, интенсифицирующие перемешивание несущей жидкости и введенных в нее тромболитиков. Это обеспечивает более эффективный транспорт лекарств к месту нахождения тромба.

Очевидно практическое применение этого метода требует тщательного изучения особенностей генерирования течений, их структуры, выявления оптимальной конфигурации магнитного поля и других физических характеристик системы. Несмотря на предпринятые исследования по этой теме (см., например, [2–6]), на настоящий момент многие ее важные аспекты не изучены. Так, в теоретических моделях [2, 5, 6] рассматривался бесконечно длинный канал с каплей (облаком) феррожидкости, а влияние самого тромба на генерируемые течения не рассматривалось.

Цель работы – развитие научной основы магнитоиндуцированной интенсификации транспорта лекарств в тромбированных кровеносных сосудах. Мы предлагаем модель течений, генерируемых бегущим осциллирующим полем в канале с каплей феррожидкости, находящейся рядом с тромбом, а также приближенный метод решения возникающих уравнений.

Основные приближения и математическая модель

Ради максимального упрощения математической стороны дела в качестве модели кровеносного сосуда мы рассмотрим не цилиндрический канал, а полубесконечную плоскую щель, заполненную немагнитной ньютоновской жидкостью. Отметим, что переход к цилиндрическому каналу не создает принципиальных трудностей, но делает вычисления более громоздкими и менее прозрачными. Рассматриваемая модельная система проиллюстрирована на рис. 1. Левый конец щели за-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 20-02-00022, 21-52-12013, и Гос.задания, проект FEUZ 2023-0020.

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УДК [530.12+530.145](082)

DOI: 10.17223/00213411/66/2/50

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ПЕРВОЙ КОНЕЧНОЙ РАЗНОСТИ
КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ
НА ЧАСТОТАХ ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РДЗСЛ.В. Грунская¹, В.В. Исакевич², Д.В. Исакевич²¹ *Владимирский государственный университет имени Николая Григорьевича
и Александра Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия*² *ООО «Собственный вектор», г. Владимир, Россия*

Показано преимущество применения айгеноскопии при обработке первой конечной разности (по сравнению с обработкой исходного ряда наблюдений вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое – E_z) в задаче выявления аномалий некоррелированных компонент E_z , спектрально-локализованных на частотах гравитационного излучения сорока трех релятивистских двойных звездных систем с малым эксцентриситетом. Результаты получены при анализе многолетних наблюдений E_z на станции Душети.

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

Введение

С 2000 г. – года появления первой статьи в журнале «Известия вузов. Физика», посвященной поиску корреляций между электромагнитным полем Земли и периодическими гравитационными полями астрофизического происхождения, прошло 22 года. За этот период времени по направлению наших исследований по достоверному обнаружению гравитационно-волнового (ГВ) воздействия на земной электромагнетизм получен ряд важных результатов, которые были отражены в данном журнале.

В первых работах обсуждалась актуальность постановки проблемы обнаружения периодических возмущений электромагнитных полей в резонаторе Земля – ионосфера, индуцированных гравитационно-волновыми источниками астрофизического происхождения. На первом этапе исследований осуществлено обнаружение периодического гравитационного воздействия Луны и Солнца, а именно, лунно-солнечных приливов в электромагнитном поле приземного слоя атмосферы. Представлены модели воздействия лунных приливов на электрическое и геомагнитное поля приземного слоя атмосферы. С помощью синтезированного для работы в инфранизкочастотном диапазоне оптимального приемника были выделены и оценены амплитуды гармонических компонент вариаций электрического поля пограничного слоя атмосферы на частотах, соответствующих лунным приливам, дана оценка отношения сигнал/шум на частотах приливов. Уровень электрического поля на частотах лунных приливов по экспериментальным данным оказался близким к теоретическим модельным оценкам.

Вопрос о достоверности выделения лунных приливов в электрическом и геомагнитном полях с помощью оптимального приемника (корреляционный квадратурный приемник), вследствие малого отношения сигнал/шум, а также обнаруженный факт непостоянства уровня сигнала на конкретных частотах лунных приливов при изменении длины реализации явились толчком к поиску иного метода обнаружения энергонедоминирующих периодических процессов.

Был разработан и запатентован метод «айгеноскопии» [1], осуществляющий спектральный анализ собственных векторов (СВ) в многолетних временных рядах вертикальной составляющей напряженности электрического поля, и показана его эффективность для выявления спектрально-локализованных составляющих с относительным энергетическим вкладом вплоть до 10^{-4} [2]. Новизна разработанного метода состоит в том, что спектральному анализу подвергается не сам исходный временной ряд, а его собственные векторы, на которые он раскладывается, что позволя-

РОЖДЕНИЕ И РАСПАД ХИГГС-БОЗОНОВ В МЮОННЫХ КОЛЛАЙДЕРАХ. Ч. I

С.К. Абдуллаев, М.Ш. Годжаев, А.К. Гулаева

Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджанская Республика

В рамках Минимальной суперсимметричной стандартной модели рассмотрен процесс рождения и распада хиггс-бозонов H , h и A в произвольно поляризованных мюон-антимюонных столкновениях: $\mu^- \mu^+ \rightarrow (H^*, h^*, A^*) \rightarrow f\bar{f}$. Здесь $f\bar{f}$ – пара фундаментальных фермионов – тау-лептонов $\tau^- \tau^+$, $c\bar{c}$ -, $b\bar{b}$ -, $t\bar{t}$ -кварков. С учетом произвольных поляризаций $\mu^- \mu^+$ - и $f\bar{f}$ -пары получено общее выражение для эффективного сечения процесса. Определены выражения для СР-нечетных асимметрий, связанные с продольными и поперечными поляризациями мюон-антимюонной пары, а также степени продольной и поперечной поляризации фермиона. Изучение этих характеристик может дать ценную информацию о природе хиггс-бозона.

Ключевые слова: хиггс-бозон, мюон-антимюонная пара, продольная спиновая асимметрия, поперечная спиновая асимметрия, степень продольной (поперечной) поляризации, топ-кварк.

Введение

Стандартная модель (СМ) достигла больших успехов в описании различных процессов физики высоких энергий. Особенно с открытием хиггс-бозона СМ H_{SM} в Большом адронном коллайдере (БАК) коллаборациями ATLAS и CMS в 2012 г. [1, 2] (см. также обзоры [3–5]) началась новая эра в физике высоких энергий. С одной стороны, экспериментально подтвердился механизм генерации масс фундаментальных частиц, а с другой стороны, СМ получила логическое завершение и приобрела статус стандартной теории.

Несмотря на успехи СМ, у этой теории имеются свои трудности. Одна из трудностей этой модели связана с перенормировкой массы хиггс-бозона. Дело в том, что для всех частиц СМ перенормировка массы хорошо работает, а в случае хиггс-бозона возникает проблема: вакуум, оказывая сильное влияние на массу хиггс-бозона, увеличивает его массу в триллионы раз, такая частица уже не может играть роль хиггсовского бозона. Внутри СМ нет никакого сдерживающего фактора, останавливающего рост массы хиггс-бозона за счет виртуальных частиц. Здесь возможен такой выход из трудного положения. Если в природе имеются какие-то другие частицы, отсутствующие в СМ, то они в виртуальном виде могут компенсировать влияние на массу хиггс-бозона. Самое важное здесь то, что в Минимальной суперсимметричной стандартной модели (МССМ) такая компенсация сама по себе возникает по построению теории.

Отсутствие частиц темной материи в СМ также является одной из трудностей этой теории. Астрофизики считают, что во Вселенной, кроме обычного вещества в виде планет, звезд, черных дыр, газопылевых облаков, нейтрино и т.д., существуют и частицы совершенно иной природы, которые мы не видим ни в каком диапазоне электромагнитных волн. Это частицы темной материи, которые практически не взаимодействуют с обычным веществом и излучением. В СМ нет ни одной частицы, подходящей на эту роль. В МССМ существуют частицы нейтрино, sneutrino, гравитино, глюино, которые могут быть кандидатами в темную материю.

Указанные здесь факты, а также и другие причины свидетельствуют о выходе за рамки СМ. При этом особое предпочтение дает МССМ [6–9]. В этой модели существуют пять хиггсовских бозонов: СР-четные H - и h -бозоны, СР-нечетный A -бозон и заряженные H^- - и H^+ -бозоны. В МССМ хиггсовский сектор характеризуется массовыми параметрами M_H , M_h , M_A , $M_{H^\pm}$, угловыми параметрами α и β . Из них параметры $\tan\beta = v_2/v_1$ (v_1 и v_2 – вакуумные значения хиггс-бозонных полей) и M_A считают свободными, а остальные выражаются через них:

$$M_{H(h)}^2 = \frac{1}{2}[M_A^2 + M_Z^2 \pm \sqrt{(M_A^2 + M_Z^2)^2 - 4M_A^2 M_Z^2 \cos^2 2\beta}],$$

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2,$$

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ КЛЕЙНА – ФОКА – ГОРДОНА ДЛЯ СУММЫ ПОТЕНЦИАЛА МОРЗЕ И КОЛЬЦЕОБРАЗНОГО ПОТЕНЦИАЛА

В.А. Тарвердиева

Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика

Найдено аналитическое решение уравнения Клейна – Фока – Гордона для суммы потенциала Морзе и кольцеобразного потенциала. Собственные значения энергии и соответствующие радиальные и азимутальные волновые функции определяются для произвольного значения орбитального квантового числа $l \neq 0$. Для преодоления трудностей, возникающих в случае $l \neq 0$ в центробежной части суммы потенциала Морзе и кольцеобразного потенциала для связанных состояний, была применена аппроксимация Пекериса. Соответствующие собственные функции представлены через полиномы Якоби и Лагерра для произвольных l состояний. Показано, что уровни энергии и собственные волновые функции очень чувствительны к выборам потенциальных параметров.

Ключевые слова: уравнение Клейна – Фока – Гордона, потенциал Морзе плюс кольцеобразный потенциал, метод Никифорова – Уварова.

Введение

В квантовой механике нахождение точных решений волновых уравнений остается актуальной задачей [1–3]. С помощью точных решений волновых уравнений Шредингера, уравнений Клейна – Фока – Гордона (КФГ) и уравнений Дирака можно описать физические свойства микрообъектов в разных потенциальных моделях [1–4]. Существует ряд интересных работ с использованием различных методов решения уравнения КФГ с физическими потенциалами [5]. Есть много разных видов потенциалов взаимодействия, например, Маннинга – Розена [6], Хюльтена [7], Клингберга [8] и другие. В работе [9] представлено решение уравнения КФГ для суммы потенциала Клингберга и кольцеобразного потенциала. Для различных потенциалов уравнения КФГ и Дирака были изучены в работах [10–21].

При различных потенциалах применяются разные методы в исследованиях радиальной и азимутальной части волновых уравнений для $l = 0$, например, метод факторизации [22], метод интегрирования по траекториям [23], метод Никифорова – Уварова (НУ) [24]. Метод НУ дает точное решение уравнения КФГ для некоторых видов потенциалов.

Потенциал Морзе представляет собой удобную модель межатомного взаимодействия для потенциальной энергии двухатомной молекулы. Потенциал Морзе используется при расчете и анализе термодинамических параметров, особенно ангармонических эффектов.

В настоящей работе с помощью метода НУ решено уравнение КФГ для потенциала Морзе плюс кольцеобразного потенциала при произвольном значении орбитального квантового числа ($l \neq 0$). Найдены собственные значения энергии и соответствующие радиальные волновые функции для любого значения орбитального углового момента. В работе [25] было решено уравнение КФГ для потенциала Морзе при орбитальном квантовом числе ($l = 0$) с помощью метода НУ.

Результат в данной статье совпадает при орбитальном квантовом числе $l = 0$ с результатом работы [25].

1. Решение уравнения Клейна – Фока – Гордона для суммы потенциала Морзе и кольцеобразного потенциала в связанном состоянии

Как известно, потенциал Морзе определяется в виде

$$V(r) = D(e^{-2a(r-r_e)} - 2e^{-a(r-r_e)}). \quad (1)$$

Здесь D – глубина потенциальной ямы; r_e – равновесное расстояние.

Сумма потенциала Морзе и кольцеобразного потенциала будет равна

$$V(r, \theta) = D(e^{-2a(r-r_e)} - 2e^{-a(r-r_e)}) + \frac{\beta' + \beta \cos \theta}{r^2 \sin^2 \theta}, \quad (2)$$

β и β' – строго положительные постоянные.

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 537

DOI: 10.17223/00213411/66/2/77

**АТОМНАЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА
И КВАНТОВЫЙ КОНФАЙНМЕНТ В НАНОКРИСТАЛЛИТАХ КРЕМНИЯ.
ЧАСТЬ I. НАНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ,
ПОГРУЖЕННЫЕ В МАТРИЦУ ОКСИДА КРЕМНИЯ***

Ф.Н. Томилин^{1,2}, Ю.А. Мельчакова³, П.В. Артюшенко^{2,4,5}, А.В. Рогова^{2,5}, П.В. Аврамов⁶

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

⁴ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», г. Красноярск, Россия

⁵ Красноярский государственный медицинский университет им. профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого,
г. Красноярск, Россия

⁶ Кёнбукский национальный университет, г. Тэгу, Республика Корея

В первой части обзора рассмотрены способы синтеза, структура и фотолюминесцентные свойства нанокристаллитов кремния, погруженных в матрицу оксида кремния, в частности, пористый кремний и нанокремний, полученный методами химического осаждения из газовой фазы (Chemical vapor deposition, CVD), ионной имплантации, напыления, и реакционного испарения. Показано, что основными факторами, влияющими на величину запрещенной щели нанокристаллитов кремния, являются эффекты квантового ограничения и различного рода дефекты, включая поверхностные, как самих нанокристаллов кремния, так и SiO₂-матрицы. Для пористого кремния было доказано, что эффекты размерного ограничения являются причиной эффективной люминесценции из-за проявления фононов в резонансно-возбужденной области фотолюминесценции. Особое внимание уделено исследованиям природы запрещенной щели и показано, что она является не прямой как для пористого кремния, так и для различного типа кремниевых квантовых точек. Для всех нанобъектов наблюдаются четко выраженные эффекты размерного ограничения, при этом зависимость величины запрещенной щели от эффективных размеров для различных образцов разная. Показано, что роль поверхности нанокристаллов кремния и Si/SiO₂ интерфейсов в формировании электронной структуры является определяющей.

Ключевые слова: кремниевые кластеры, атомная структура, электронная структура, запрещенная щель, оптические свойства, квантовый конфайнмент.

Введение

Экспериментальное обнаружение люминесценции при комнатной температуре вызвало большой интерес к исследованию структуры и характеристик кремниевых нанокристаллов, имплантированных в матрицу SiO₂ [1], а также пористого кремния [2, 3]. В настоящее время синтез и исследование структуры и свойств кремниевых квантовых точек (КТ) на основе нанокристаллического кремния подробно освещены в ряде детальных обзоров (см., например, [4]). В частности, отмечалось [5–8], что наибольший фундаментальный интерес представляют эффекты размерного ограничения в кремнии, имеющем непрямую запрещенную щель [5–8]. Возможности использования нанокристаллического кремния в качестве источников света, возбуждаемых внешним потенциалом [9–14], высокоэффективная фотолюминесценция кремниевых точек, допированных ионами Er³⁺ [15–20], и использование кремниевых точек в качестве элементов постоянной памяти [21, 22] представляют особый интерес. В ходе синтеза размер образующихся частиц необходимо точно контролировать для достижения поставленных технологических задач. Для их синтеза используются несколько методов:

1. Пористый кремний создается электрохимическим травлением монокристалла кремния в плавиковой кислоте [3, 13, 23].

2. Имплантация ионов кремния в матрицу SiO₂ с последующей термоиндуцированной кристаллизацией кластеров кремния [23–27].

* Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2020-0033.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САМОСБОРКИ ФРАКТАЛЬНЫХ НАНООБЪЕКТОВ В ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-НАНОСИСТЕМАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ*

С.Е. Игошина, Е.А. Лыков, Н.Д. Якушова, А.А. Карманов, И.А. Пронин

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

В рамках методов оптической спектрометрии и ИК-спектроскопии исследовано влияние УФ-излучения на самосборку фрактальных нанообъектов в золь-гель-наносистемах различного состава. Установлены колебательные моды в ИК-спектрах, демонстрирующие однозначную взаимосвязь коэффициента пропускания ИК-излучения и времени облучения. Предложена схема самосборки, в рамках которой роль воздействия УФ-излучения сводится к частичному расщеплению формирующихся фрактальных агрегатов на более мелкие фрагменты. Показано, что с течением времени рост фрактальных нанообъектов начинает преобладать над процессом их расщепления.

Ключевые слова: *инфракрасная спектроскопия, золь-гель-технология, воздействие УФ-излучения, самосборка, фрактальные агрегаты.*

Введение

Тематика самосборки и самоорганизации все чаще освещается в научной литературе применительно к созданию наноматериалов, структурные особенности которых контролируются внешними воздействиями на ранних этапах синтеза [1–3]. Например, в нашем более раннем исследовании показано, что одним из таких воздействий может являться охлаждение золь-гель-наносистемы до температуры жидкого азота [4]. На основе такого золь-геля, который был первоначально заморожен, а затем медленно нагрет до комнатной температуры, возможно получение наноматериалов с новой уникальной структурой, перспективной для целей газовой сенсорики, фотокатализа и ряда других областей [5–8]. В частности, было продемонстрировано формирование в структуре наноматериала самоорганизующихся областей с близкой к гексагональной формой. Причем в зависимости от времени нагрева до комнатной температуры размер данных областей является различным. Так, при медленном нагреве (в течение 120 мин) из первичных наночастиц в процессе самосборки образуются нанообъекты, для которых характерно заметное снижение степени агломерации.

Известны исследования, демонстрирующие схожие результаты, например, возможность получения ортогонально собранных трехмерных полупроводниковых нанопроводов из оксидов металлов [9]. В частности, продемонстрирована спонтанная ортогональная упаковка композитных наностержней поли(этиленоксид)-блок-полистирол и кремневольфрамовая кислота, термическое воздействие на которые приводит к образованию массива трехмерных нанопроводов WO_3 , легированных кремнием. Показано, что используя другие полиоксометаллаты, возможно обобщить предложенный метод изготовления 3D-наноструктур на различные оксиды металлов.

Изучены возможности направленной самосборки с использованием лазерного паттерна, созданного жестким ультрафиолетом [10]. Продемонстрированы перспективы использования лазерного излучения с центральной длиной волны 193 нм для подготовки поверхности с контролируемыми химическими свойствами на микро- и наноуровне. В частности, предложены методы направленной самосборки блок-сополимеров с помощью графоэпитаксии, микро- и нанопаттернирование металлооксидных кластеров, а также полимерных поверхностей для микроэлектронных и биологических приложений. Кроме того, установлено, что с одной стороны жесткое УФ-излучение сильно поглощается органическими фрагментами (в том числе пленками толщиной менее 2 нм), а с другой стороны, для формирования самособирающихся монослоев требуется излучение с длиной волны короче 200 нм.

Цель настоящей работы – исследование воздействия УФ-излучения на самосборку фрактальных нанообъектов в золь-гель-наносистемах различного состава. Идея данного исследования базируется на ключевых результатах предшествующих работ, в рамках которых, с одной стороны, показано, что операция высокотемпературного отжига, обязательная для классической золь-гель-

* Работа выполнена при поддержке Ректорского гранта ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ С УЧЕТОМ МНОГОФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ*

С.В. Белибихин, Н.Н. Конобеева, М.Б. Белоненко

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Россия

Изучены особенности эволюции предельно коротких импульсов оптического диапазона при распространении в диэлектрической среде с полупроводниковыми углеродными нанотрубками с учетом процессов многофотонного поглощения. Выявлена зависимость интенсивности поля импульса от числа фотонов, которые поглощаются при взаимодействии с электромагнитным импульсом, а также от величины накачки импульса.

Ключевые слова: предельно короткий импульс, углеродные нанотрубки, многофотонное поглощение.

Введение

Многофотонное поглощение (МП) – это квантово-механический процесс, при котором атом/молекула поглощает несколько фотонов одновременно и, следовательно, может преодолеть энергетическую щель, которая превышает энергию одиночного фотона, за один акт возбуждения [1, 2]. Данный фотофизический процесс находит свое применение в различных областях науки. Например, методы двухфотонного поглощения используются для получения информации о многих важных молекулярных параметрах, позволяют прояснить вопросы нарушения инверсии симметрии и переноса заряда на молекулярных масштабах [3]. Многофотонное поглощение позволяет продвинуться в понимании нелинейных процессов в полупроводниковых устройствах [4, 5], в том числе с использованием наноразмерных структур. Это очень важно, поскольку в последнее время разрабатывается все больше устройств с использованием различных наноматериалов, например, углеродных нанотрубок (УНТ) [6–8]. Данные структуры являются привлекательными благодаря своим уникальным свойствам [9] и используются при создании приборов опто- и наноэлектроники [10–12], в том числе за счет своего стабилизирующего действия на импульсы [13]. С этой точки зрения важно изучать взаимодействие высокоинтенсивного излучения с УНТ с учетом многофотонного поглощения, которое играет очень важную роль в данном процессе.

Ранее нами построена модель, описывающая эволюцию предельно коротких оптических импульсов в среде с углеродными нанотрубками с учетом нелинейного поглощения [14]. В настоящей работе мы постараемся адаптировать данную модель к задаче о многофотонном поглощении.

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим диэлектрическую среду с массивом УНТ (все сонаправлены), через которую проходит трехмерный предельно короткий оптический импульс. Причем волновой вектор направлен перпендикулярно осям нанотрубок.

Закон дисперсии для электронов углеродных нанотрубок имеет вид [9]

$$\varepsilon(p, s) = \pm \gamma_0 \sqrt{1 + 4 \cos(ap) \cos\left(\frac{\pi s}{m}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{\pi s}{m}\right)}, \quad (1)$$

где $s = 1, 2, \dots, m$, нанотрубка имеет тип $(m, 0)$; $\gamma_0 = 2.7$ эВ; $a = 3b/2\hbar$, b – расстояние между соседними атомами углерода в УНТ; p – компонента квазиимпульса электрона проводимости вдоль оси УНТ.

Вектор-потенциал имеет вид: $\mathbf{A} = (0, 0, A(x, y, z, t))$, а плотность электрического тока: $\mathbf{j} = (0, 0, j(x, y, z, t))$.

Используя переход к цилиндрической системе координат, а также учитывая калибровку $\mathbf{E} = -c^{-1} \partial \mathbf{A} / \partial t$, запишем трехмерное волновое уравнение на ненулевую компоненту векторного потенциала:

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № 0633-2020-0003).

РАЗРАБОТКА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПММА И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СОСТАВА CdSe/CdS, CdSe/ZnS

У.А. Степанова¹, А.Г. Мурадова¹, Х. Аль-Майяхи¹, Е.Н. Тельминов²,
К.Т. Хахимов¹, Т.А. Солодова², Л.Г. Самсонова², Р.М. Гадиров²

¹ *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия*

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

Получены квантовые точки CdSe, CdSe/CdS и CdSe/ZnS. Исследовано влияние толщины и типа оболочки на фотолюминесцентные свойства квантовых точек. Определена оптимальная толщина оболочки для каждого типа, позволяющая получать квантовые точки с улучшенными фотолюминесцентными свойствами. Разработаны тонкопленочные наноконпозиты на основе полиметилметакрилата, содержащие квантовые точки CdSe/CdS и CdSe/ZnS.

Ключевые слова: лазерно-активные среды, наноконпозиты, полупроводниковые квантовые точки, структура ядро/оболочка, полиметилметакрилат.

Введение

Изобретение лазеров на красителях произвело революцию в лазерной спектроскопии, также они стали родоначальником нового типа лазеров с длительностью импульса менее пикосекунды (лазеры сверхкоротких импульсов). Для лазеров на красителях возможно получить плавную перестройку длины волны излучения от ближнего УФ- до ближнего ИК-излучения. Однако для данного типа лазеров наблюдается ряд недостатков, таких как наличие термооптических искажений, сравнительно большой размер и высокая стоимость лазерной системы, а также токсичность растворителя и его воспламеняемость [1].

Для решения данных проблем было предложено введение красителей в полимерные матрицы и создание твердотельных лазерно-активных сред. Твердотельный лазер на основе красителей позволяет избежать проблем токсичности и воспламеняемости, представляет собой недорогую среду усиления, компактен и прост в эксплуатации и обслуживании. Тем не менее остается ряд проблем, таких как низкая фотохимическая устойчивость красителей в полимерной матрице, необходимость подбора удовлетворительных характеристик в отношении краситель/матрица, сложность введения красителя в полимерную матрицу, а также проблема однородности получаемой среды, которая уступает растворам красителей [2].

Использование квантовых точек (КТ) для создания лазерно-активных сред может решить ряд проблем, связанных с эксплуатацией лазеров на красителях. Полупроводниковые КТ зарекомендовали себя как перспективные материалы в области светодиодов, солнечных элементов и фотодетекторов [3–5]. Благодаря уникальным люминесцентным свойствам, возможности варьирования ширины запрещенной зоны, а также узким пикам флуоресценции данные нанокристаллы могут найти применение в области лазерных технологий в качестве лазерно-активных сред [6, 7]. В частности, актуальными на сегодняшний день являются работы, связанные с методиками нанесения коллоидных КТ на различные подложки и изучение их спектрально-люминесцентных свойств.

Халькогениды металлов, в частности CdSe, являются наиболее изученными, так как они обладают узким распределением частиц по размерам, относительно высокой стабильностью и возможностью варьирования люминесценции во всем видимом диапазоне длин волн, что делает их привлекательным материалом для применения в различных областях [8–10]. Однако «голые» КТ CdSe без дополнительной модификации поверхности обладают слабой фотолюминесценцией и низкими значениями квантового выхода (КВ). Это связано с протеканием оже-процессов в КТ и наличием поверхностных дефектов, создающих электронные ловушки. Создание полупроводниковой оболочки на поверхности КТ позволяет пассивировать дефекты, значительно улучшить эффективность фотолюминесценции и повысить квантовый выход [11, 12]. В зависимости от материала оболочки выделяют следующие типы КТ со структурой ядро/оболочка: тип I, обратный тип I и

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ И $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$

З.Т. Азаматов, М.А. Йулдошев, Н.Н. Базарбаев

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники
Национального университета Узбекистана, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Проведены исследования влияния γ -облучения на фоторефрактивные свойства образцов – кристаллов ниобата лития и его кристаллов, легированных железом. Установлено, что γ -облучение приводит к увеличению фоторефрактивной чувствительности образцов. Обнаружен эффект оптического окрашивания, обусловленный распадом радиационных центров под действием света. Исследовано влияние различных доз γ -облучения на спектры оптического поглощения образцов кристаллов ниобата лития и его кристаллов, легированных железом.

Ключевые слова: гамма-облучение, показатель преломления, оптическое поглощение, фоточувствительность, нелинейно-оптические и фоторефрактивные кристаллы.

Введение

Применение голографического метода хранения информации представляет собой один из эффективных путей решения проблемы надежного долговременного хранения информации с высокой информационной плотностью носителей [1].

В работе [2] отмечено, что одним из самых важных элементов голографической записи информации является регистрирующая среда, требования к которой в реальных устройствах могут изменяться в широких пределах: по чувствительности, разрешающей способности, времени хранения информации, времени записи, дифракционной эффективности и другим параметрам голограмм. Свойство обратимости (реверсивность) определяет возможность оперативного стирания записанной голограммы и записи новой. Необратимые регистрирующие материалы пригодны для использования только в постоянных запоминающих устройствах. К числу реверсивных сред относятся магнитооптические пленки, термопластические и фотохромные материалы, электрооптические кристаллы, например, кристаллы ниобата лития и танталата лития, халькогенидные стеклообразные полупроводники. Голографические носители должны удовлетворять строгим критериям, включая высокую фоточувствительность, безусадочность, оптическую прозрачность, неразрушающее считывание, термо- и влагостойкость, а также иметь низкую цену. Разработчики нашли множество материалов: фазовращающие материалы, фоторефрактивные кристаллы типа ниобата лития (LiNbO_3), органические полимеры, жидкие кристаллы, полимеры со структурной поверхностью и даже такие экзотические среды, как бактериородопсины в желатиновых матрицах [3].

В данной работе исследовано влияние γ -облучения на оптические и голографические свойства кристаллов ниобата лития. При голографической записи на кристаллах ниобата лития и танталата лития основную роль играет фоторефрактивный эффект (ФРЭ). Фоторефрактивный эффект – локальное изменение показателя преломления (Δn) кристаллов под действием лазерного излучения – впервые был обнаружен в кристаллах ниобата и танталата лития [4]. Обнаруженное явление препятствует широкому практическому применению этих кристаллов в традиционной оптике, однако эффект фоторефракции создает основу для записи объемных фазовых голограмм в сегнетоэлектрических кристаллах.

На сегодняшний день предложено несколько механизмов ФРЭ, основными из которых являются объемный фотовольтаический эффект [5, 6] и фотоиндуцированное изменение спонтанной поляризации [7, 8]. Величиной, характеризующей способность кристаллов к ФРЭ, является чувствительность S , определяемая как отношение изменения показателя преломления Δn к величине поглощенной энергии $S = \Delta n / \Delta W$ [9]. В общем случае для данного кристалла чувствительность определяется свойствами и относительной концентрацией центров, ответственных за ФРЭ. Эти свойства и определяют такие направления исследования фоторефракции в кристаллах ниобата лития, как введение примесей [10], создание дефектов за счет изменения стехиометрии [11] и т.п.

В настоящее время кристаллы LiNbO_3 являются одним из наиболее технологически перспективных материалов для нелинейно-оптических приложений [12–15]. Важная особенность

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.3

DOI: 10.17223/00213411/66/2/113

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ УДАРНИКОВ
С ПОДВОДНЫМИ РАЗНЕСЕННЫМИ ПРЕГРАДАМИ*С.П. Батуев¹, В.В. Буркин², А.С. Дьячковский², А.Н. Ищенко², А.В. Радченко¹,
П.А. Радченко¹, А.Ю. Саммель², Е.Ю. Степанов², А.В. Чупашев²¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия² Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, г. Томск, Россия

Представлены экспериментально-теоретические результаты исследования высокоскоростного взаимодействия стальных суперкавитирующих ударников с разнесенными преградами из алюминиевого сплава. Экспериментально определены возможности стальных суперкавитирующих ударников при высокоскоростном взаимодействии с алюминиевыми преградами толщиной $h = 3$ и 8 мм в диапазоне скоростей $200\text{--}450$ м/с. Полученные результаты использовались для верификации математической модели, с помощью которой проведены параметрические исследования высокоскоростного взаимодействия ударника с тремя типами разнесенных преград из алюминиевого сплава в диапазоне скоростей $200\text{--}600$ м/с.

Ключевые слова: кинетический ударник, высокоскоростное взаимодействие, математическая модель, разнесенная преграда.

Введение

Основным кинетическим средством поражения подводных преград являются суперкавитирующие ударники. Их специфическая форма [1–5] в виде усеченного конуса с удлинением $12\text{--}18$ и затупленной головной частью позволяет ударнику в высокоскоростном режиме проходить в воде значительные (несколько десятков метров) расстояния за счет образования суперкаверны [6–9] и поражать подводные преграды различной конструкции. В [10–12] приведены результаты взаимодействия суперкавитирующих ударников с подводными преградами в виде одинарных металлических пластин или в виде многослойных пластинчатых конструкций. Особый интерес вызывает взаимодействие суперкавитирующих ударников с разнесенными подводными преградами, поскольку их исполнение позволяет варьировать конструкцию преград и целенаправленно улучшать их защитные свойства в более широких пределах.

Целью данной работы является экспериментально-расчетное исследование взаимодействия стальных суперкавитирующих ударников с подводными разнесенными преградами из сплава алюминия в диапазоне скоростей встречи $200\text{--}600$ м/с.

Экспериментально-расчетные результаты

В качестве суперкавитирующего ударника в исследованиях использовался его калиберный вариант. Внешний вид калиберного суперкавитирующего ударника из стали массой 22 г показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид калиберного суперкавитирующего ударника

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00233.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЦЕРИЯ И МАРГАНЦА ПРИ ЛАЗЕРНОМ СИНТЕЗЕ*

Е.Д. Фахрутдинова, Т.С. Харламова, О.А. Реутова,
А.Г. Голубовская, В.А. Светличный, О.В. Водянкина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Развитие высокоэнергетических физических методов получения новых функциональных композитных наноматериалов представляет интерес для целого ряда приложений. В данной работе с помощью мощного импульсного лазерного воздействия получены и исследованы материалы на основе оксидов церия и марганца, перспективные для гетерогенного катализа. Композиты были получены из индивидуальных оксидов, синтезированных импульсной лазерной абляцией (Nd:YAG-лазер, 1064 нм, 7 нс, 20 Гц) металлов в воде, в том числе с последующей плазменной обработкой коллоидов сфокусированным лазерным излучением. Структура и состав нанокомпозитов были исследованы методами низкотемпературной адсорбции азота, дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния. Показано, что материалы обладают достаточно развитой удельной поверхностью ($94 \text{ м}^2/\text{г}$), а термообработка до 500°C не приводит к значительному укрупнению частиц. Установлено, что ионы марганца частично встраиваются в кристаллическую решетку CeO_2 с образованием твердого раствора $\text{Ce}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_2$ со структурой флюорита. Плазменная лазерная обработка на стадии синтеза коллоидов стимулирует образование данного твердого раствора.

Ключевые слова: оксид церия, оксид марганца, оксидные композиты, твердый раствор, импульсная лазерная абляция, плазменная лазерная обработка.

Введение

Материалы на основе оксидов церия CeO_2 и марганца MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , а также композиты на их основе вызывают интерес в связи с их применением в различных областях, особенно в гетерогенном катализе [1–9]. Использование оксидных композитов позволяет улучшить их функциональные свойства по сравнению с соответствующими однокомпонентными системами, в том числе в результате формирования дефектов структуры и/или межфазных границ, обеспечивающих повышение кислородной проводимости, улучшения окислительно-восстановительных свойств, термической устойчивости [10–12]. При этом большое влияние на структуру и свойства получаемых композитных материалов оказывает метод их получения.

В этой связи в последнее время особое внимание уделяется развитию методов синтеза, приводящих к формированию активных высокодисперсных и наноструктурированных композитных материалов. Для получения композитов $\text{MnO}_x\text{--CeO}_2$ часто используют такие химические методы, как золь-гель синтез [13], соосаждение [14] и темплатный синтез [15]. Вместе с тем для получения сложных оксидов и оксидных композитов перспективны и высокоэнергетические физические методы синтеза, например метод импульсной лазерной абляции (ИЛА) в жидкости [16]. В последние десятилетия ИЛА все шире используется для получения разнообразных функциональных наноматериалов [16, 17]. К преимуществам метода относится простота синтеза и вариативность состава получаемых частиц, их высокая активность и отсутствие прекурсоров, возможность синтеза коллоидных наночастиц (НЧ) в чистых растворителях.

В данной работе с помощью высокоэнергетического лазерного воздействия из объемных металлических мишеней церия и марганца получены индивидуальные наноксиды, которые затем были использованы для синтеза композитных наночастиц $\text{MnO}_x\text{--CeO}_2$. Показано, что применение импульсной лазерной абляции позволит получать чистые оксиды в высокодисперсном и дефектном состоянии, а использование технологии дополнительной плазменной лазерной обработки смеси дисперсий улучшает взаимодействие компонентов в композитах с формированием фаз смешанного состава и протяженных межфазных границ.

* Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2021-1388 от 13.10.2021 г.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПОРИСТОГО NiTi*

Е.С. Марченко, Г.А. Байгонакова, Ю.Ф. Ясенчук, К.М. Дубовиков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Исследовано влияние кратковременной термообработки на механические характеристики и мартенситные превращения (МП) пористого сплава NiTi. Отжиг проводили на воздухе в течение 5 мин в температурном интервале 500–1000 °С. При термообработке с заданными условиями меняется структура и фазовый состав поверхностных областей пористого сплава на основе NiTi, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Это должно оказывать влияние на механические свойства сплава, в том числе на обратимые мартенситные превращения, вызванные внешней нагрузкой и термоциклированием. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии установлены факты обратимого МП у всех образцов в интервале температур 50–100 °С при термоциклировании и сдвиг температур начала и конца прямого МП у образца NiTi600. Методами одноосного растяжения и трехточечного изгиба не обнаружено участков текучести, обусловленных переориентацией мартенситных вариантов и/или индуцированных напряжением МП. Между деформационными зависимостями $\sigma(\epsilon)$, полученными растяжением и изгибом, обнаружены качественные и количественные отличия, вызванные менее однородным распределением напряжений и деформаций при изгибе пористых образцов. Проанализированы зависимости эффективных величин предела упругости, предела прочности и модуля упругости от температуры отжига и показано, что рост оксидной оболочки и интерметаллического подслоя оказывают существенное нелинейное влияние на эффективную жесткость и прочность пористых образцов. Показано, что температурный интервал 700–800 °С является оптимальным для термообработки пористого NiTi. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации технологии изготовления имплантатов из пористого NiTi.

Ключевые слова: никелид титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термообработка, мартенситные превращения, предел упругости, предел прочности.

Введение

Сплавы на основе NiTi, близкие к эквиатомным, зарекомендовали себя в качестве перспективного материала для медицинского применения благодаря уникальному сочетанию механических свойств: эффекту памяти формы и сверхэластичности [1–11]. Помимо этого, сплавы NiTi обладают высокой коррозионной стойкостью и хорошей биохимической совместимостью с биологическими тканями [11–13]. Биохимическая совместимость сплавов NiTi определяется химическим составом, свободной поверхностной энергией и контактным углом смачивания [11–13]. Технологический процесс производства имплантатов предусматривает необходимость термомеханической обработки на воздухе, что приводит к окислению поверхности сплава, к изменению фазового состава и структурным изменениям поверхностных областей [14].

В ходе отжига на воздухе формируется оболочка, состоящая из TiO_2 , под которой формируется подслоя из интерметаллической фазы Ni_3Ti , оказывающий влияние на концентрационный состав и механические свойства основной фазы пористого сплава NiTi, в том числе на обратимые МП. Оболочка TiO_2 , в отличие от сверхупругой матричной фазы NiTi, деформируется упруго и разрушается хрупко, не выдерживая нагрузок, которые выдерживает сверхэластичная матрица.

Во время циклической физиологической деформации в биологических тканях целостность покрытия нарушается, что провоцирует электрохимическую коррозию и выход ионов никеля в окружающие живые ткани. Защита организма от токсичного влияния никеля считается одной из главных проблем при создании покрытий имплантатов из NiTi, так как ионы никеля вызывают аллергические реакции и воспалительные процессы [1, 10, 11].

Никелид титана, изготовленный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС–NiTi), обладает уникальным комплексом свойств, так как в ходе синтеза формируется пористый каркас, покрытый многофазной коррозионностойкой оболочкой сложного состава, и такому сплаву не требуется дальнейшая защитная обработка [3]. Но для придания индивидуальной формы имплантату высокотемпературный отжиг все же применяют.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10105, <https://rscf.ru/project/19-72-10105/>.

СТРУКТУРНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ 1.2 МОНОСЛОЯ Li/Cu(111)*

С.Д. Борисова, Г.Г. Русина

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

С использованием межатомных потенциалов, получаемых в рамках метода погруженного атома, проведено исследование влияния мест адсорбции адатомов лития на энергетическую и динамическую стабильность поверхностной структуры $\text{Cu}(111)-(2 \times 2)-3\text{Li}$, формирующейся при осаждении на поверхность $\text{Cu}(111)$ 1.2 монослоя Li. Расчеты структурной релаксации, фононных спектров, локальной плотности фононных состояний показали, что наиболее стабильной является структура сотового типа, в которой одновременно сосуществуют элементы поверхностного сплава Li-Cu и двумерного слоя Li. Полученные данные структурных параметров находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: динамика и релаксация поверхности, фононы, поверхностный сплав, тонкие пленки.

Введение

Исследованию физико-химических свойств устойчивых адсорбционных пленок на металлических подложках уделяется внимание как экспериментаторов [1–5], так и теоретиков [6–10]. Одним из наиболее активно используемых в данных исследованиях модельных объектов является адсорбция ОЦК щелочных металлов на поверхность ГЦК-металлов. Это обусловлено характером их взаимодействия, приводящим к образованию многочисленных поверхностных адсорбционных структур при разных степенях субмонослойной адсорбции [1, 2]. Не менее важную роль играет и структура поверхностного слоя подложки. Как правило, при субмонослойной адсорбции щелочных металлов Na, K, Cs и Rb на низкоиндексные поверхности большинства ГЦК-металлов возникают устойчивые упорядоченные структуры, представляющие поверхностный сплав или двумерный адсорбционный слой [1, 2, 10]. Однако при адсорбции Li на поверхность $\text{Cu}(111)$ устойчивая адсорбционная структура была экспериментально обнаружена лишь при осаждении 1.2 монослоя Li (МС). С использованием дифракции медленных электронов [2] и фотоэмиссии высокого разрешения [5] удалось зафиксировать структуру (2×2) сотового типа, имеющую признаки поверхностного сплава. В данной структуре элементарная ячейка содержит 3 адатома Li и 4 атома от поверхностного слоя Cu. При этом 2 атома Li занимают 3-центровые ГЦК- и ГПУ-положения адсорбции, а один атом Li замещает атом подложки. Для более полного исследования структурной устойчивости $\text{Cu}(111)-(2 \times 2)-3\text{Li}$ была использована теоретическая модель, в которой на основе изменения структурного фактора определялись возможные устойчивые атомные конфигурации адатомов при осаждении 1.2 МС Li на поверхность $\text{Cu}(111)$. Но при определении устойчивости адсорбционных структур, помимо структурного фактора, необходим учет и динамического поведения адатомов. Как известно, имеются фундаментальные колебательные дипольно-активные (stretching) и трансляционные (frustrated translation) моды адсорбата, которыми определяются диффузионная и десорбционная устойчивость адсорбционных структур [9, 10]. Несмотря на достаточно развитые экспериментальные методы определения частот колебаний адатомов, при исследовании адсорбции лития на плотноупакованную поверхность (111) возникают трудности из-за его малой массы и низкой температуры плавления, приводящих к высокой летучести. Конкретно для системы Li/Cu(111) экспериментально были получены значения энергии колебаний лишь высокочастотной фундаментальной S (stretching)-моды и только при малых степенях адсорбции $0.01 \leq \Theta \leq 0.33$ МС [4]. При этом четкой картины соответствия частоты дипольных колебаний определенной структуре не было сформировано. Для данной системы при субмонослойной адсорбции Li такое соответствие было рассчитано теоретически лишь в работе [8].

В настоящей работе представлены результаты детального исследования возможных равновесных атомных конфигураций и колебательных свойств в системе Li/Cu(111) при степени адсорбции Li $\Theta = 1.2$ МС. Были проведены расчеты релаксации поверхности, фононных спектров и

* Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФПМ СО РАН, проект № FWRW-2022-0001.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.1.03

DOI: 10.17223/00213411/66/2/139

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ УСИЛЕНИЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ В ТОНКИХ МИШЕНЯХ ПРИ КОСОМ ВЛЕТЕ***

М.В. Булгакова, В.С. Малышевский, Г.В. Фомин

Южный Федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ключевые слова: *излучение Вавилова – Черенкова, переходное излучение, кварцевое стекло, релятивистские частицы.*

В литературе активно обсуждаются возможности генерации черенковского излучения в различных частотных диапазонах. Потребность в таких источниках объясняется возможными технологическими применениями, в частности, для целей диагностики угловых характеристик пучков ускоренных частиц. Известно, что в некоторых веществах действительная часть диэлектрической проницаемости в рентгеновском диапазоне частот вблизи краев линий поглощения может быть больше единицы. В таком случае оказывается возможным выполнение порога для возникновения рентгеновского излучения Вавилова – Черенкова в достаточно узком спектральном диапазоне [1, 2]. В более мягком диапазоне частот, например, в ультрафиолетовом или оптическом, для получения монохроматического излучения необходимо иметь мишень с достаточной дисперсией в интересующей области частот. Для генерации в ультрафиолетовой части спектра изучалась возможность использования газообразных мишеней инертных газов (гелий, неон, аргон), в которых поглощение слабо [3]. В оптическом диапазоне впервые наблюдалось монохроматическое излучение в мишенях из плавленого кварца [4] и алмаза [5].

Следует отметить, что при нормальном падении релятивистских частиц на мишень, у которой действительная часть показателя преломления больше, чем ~ 1.4 , выход черенковского излучения релятивистских частиц невозможен из-за полного внутреннего отражения от второй границы мишени. Для наблюдения черенковского излучения в направлении движения частицы в этом случае требуется влет частицы в мишень под некоторым углом ψ между направлением движения и нормалью к поверхности. Тогда конус черенковского излучения принимает асимметричную форму, а при достаточно большом угле ψ часть черенковского конуса испытает полное внутреннее отражение на границе мишени, а часть пройдет в направлении движения частицы.

При нормальном падении на поверхность мишени конечной толщины угловое распределение черенковского излучения имеет вид концентрических колец (см., например, [6, 7]). Эти осцилляции по полярному углу объясняются интерференцией волн, распространяющихся в направлении движения частицы и отраженных от границ мишени. Чем больше толщина мишени, тем чаще осцилляции. Угловая ширина колец обратно пропорциональна толщине мишени L . При косом влете в мишень эффективная толщина мишени увеличивается, что, с одной стороны, уменьшает угловую ширину черенковских конусов. С другой стороны, в отличие от нормального падения, эффективная толщина для разных направлений излучения зависит от азимутального угла. Последнее обстоятельство приводит к тому, что фазы отраженных от границ мишени волн теперь не постоянны, а также начинают зависеть от азимутального угла. Таким образом, нарушение азимутальной симметрии приводит к интерференционным осцилляциям по азимутальному углу. Угловое распределение в этом случае приобретает довольно сложный вид и наиболее ярко проявляется в тонких мишенях. Такое перераспределение спектрально-угловой плотности излучения, как будет показано ниже, существенно увеличивает его выход в некоторых угловых интервалах.

Хорошо известно, что в случае нормального падения быстрой заряженной частицы на поверхность раздела возникающее электромагнитное излучение поляризовано в так называемой плоскости излучения, содержащей волновой вектор излучения $\mathbf{k}$ и нормаль к поверхности. При падении частиц под углом к поверхности раздела двух сред возникает дополнительная поляризация излучения в плоскости, ортогональной плоскости излучения. Однако интенсивность этой компоненты намного меньше (см., например, [8]) и здесь ее рассматривать не будем.

Если толщина мишени настолько мала, что можно пренебречь потерями энергии частиц и многократным рассеянием, то для решения задачи о переходном и черенковском излучении в поглощающей мишени

* Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569).

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ ЛАНТАНОИДОВ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Н.Б. Эшкабилов, А.С. Курбаниязов

Самаркандский государственный университет, г. Самарканд, Республика Узбекистан

Ключевые слова: возбуждения, фотоионизация, трехступенчатая схема, оптимальная схема, фотоионный спектр, лантаноиды, энергетические уровни, потенциалы ионизации, критическая напряженность.

Введение

Метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов (ССФА), разработанный для разделения изотопов [1], дает реальную возможность развить новый подход к технологии вещества на атомно-молекулярном уровне, когда с помощью лазерного излучения можно непосредственно манипулировать атомами или молекулами определенного сорта, т.е. собирать макроскопические количества вещества по одному атому или по одной молекуле. Наиболее важным процессом лазерной атомно-молекулярной технологии вещества является, несомненно, получение особо чистых веществ в атомном состоянии [2].

Для получения особо чистых веществ или очистки вещества от примесей методом ССФА важную роль играет выбор оптимальной схемы возбуждения и ионизации атомов лазерным излучением. Такой подход к технологии вещества является наиболее универсальным и гибким. Оптимально выбранная схема селективной фотоионизации атома под действием двух или трех лазерных лучей с определенным образом настроенными частотами и подобранными интенсивностями позволяет ионизировать каждый атом за время 10^{-5} – 10^{-7} с. При 20%-м использовании энергии излучения со средней мощностью 10^3 Вт на фотоионизацию атомов можно селективно ионизировать около одного моля вещества в час. Следовательно, установка сравнительно небольшого масштаба в принципе обеспечит получение нескольких тонн чистого вещества в год. Поэтому метод ССФА в сочетании с перестраиваемыми лазерами со средними выходными мощностями 10^2 – 10^3 Вт можно рассматривать как достаточно производительный метод тонкого разделения вещества на атомно-молекулярном уровне [3]. Комбинируя различные схемы возбуждения и ионизации атомов, можно выбрать самые оптимальные схемы для исследуемого атома. Выбор той или иной схемы возбуждения и ионизации определяется потенциалом ионизации и конкретным расположением уровней атома. Важную роль играет наличие и выбор лазеров для осуществления резонансной фотоионизации атомов.

В настоящей работе предложены возможные варианты выбора оптимальной схемы возбуждения и ионизации атомов редкоземельных элементов (лантаноидов) лазерным излучением. Анализ энергетических уровней лантаноидов и выбор лазеров для возбуждения показывают, что для возбуждения и ионизации удобной является трехступенчатая схема.

Результаты и их обсуждение

Возбуждение атомов осуществлялось тремя лазерами на красителях [3]. Первый лазер ($\lambda_1 = 561.8$ нм) осуществлял переход из основного в $6p^{\circ}D_3^0$ -состояние. Затем второй лазер ($\lambda_2 = 635.2$ нм) переводил атомы из этого состояния в $7s^2\ ^{\circ}D_4^0$ -состояние. Наконец, третий лазер, длина волны излучения которого плавно перестраивалась в области 641–624 нм, возбуждал атомы в $nd^{\circ}D_3^0$ -состояние.

Описание экспериментальной установки приведено в [3]. Накачка лазеров на красителях осуществлялась азотным лазером. Частота следования импульсов равнялась 10 Гц. Энергия излучения лазеров составляла ~ 10 мкДж, что обеспечивало насыщение первых двух переходов. Ширина лазерной линии была порядка 1 см^{-1} . Лучи лазеров на красителях направлялись в вакуумную камеру, в которой формировался атомный пучок Gd. Пересечение лазерных пучков с пучком атомов происходило в области между двумя плоскими электродами. Импульс напряжения на электродах формировался при разряде согласованного разрядника со световым поджигом. Для запуска разрядника использовалась часть излучения азотного лазера. Электрический импульс подавался на электроды через 20 нс после лазерных импульсов. Образующиеся ионы вытягивались из области взаимодействия и попадали во вторично-электронный умножитель, сигнал с которого поступал в стробирующий импульсный вольтметр и самопишущий прибор. Часть излучения третьего лазера проходила через интерферометр Фабри – Перо и попадала на фотодиод. Сигнал с фотодиода усиливался и записывался вторым самопишущим прибором. Развертка самопишущих приборов осуществлялась синхронно с вращением дифракционной решетки третьего лазера, при помощи которой перестраивалась его частота.