

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Международная зимняя школа по физике полупроводников

2017

Научные сообщения молодых ученых

С.-Петербург – Зеленогорск
1–6 марта 2017 года

Организатор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Программный комитет

Р.А. Сурис (председатель)
А.Ю. Маслов (секретарь)
П.А. Алексеев
А.Г. Забродский
Е.Л. Ивченко
В.И. Козуб
П.С. Копьев
Р.В. Парфеньев
О.М. Сресли
С.А. Тарасенко

Организационный комитет

А.Г. Забродский (председатель)
Р.В. Парфеньев (зам. председателя)
Е.В. Куницына (секретарь)
П.А. Алексеев
Л.Ф. Гребеновская
П.А. Дементьев
Е.Л. Ивченко
П.С. Копьев
А.Ю. Маслов

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований
Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
ООО «ИоффеЛЕД»

Воскресенье 5 марта	7
<i>И.Д. Авдеев</i> Симметрия состояний в нанопроволоках из селенида свинца . .	7
<i>А.Н. Афанасьев</i> Теория ударной ионизации в прямозонных полупроводниках и квантовых ямах	8
<i>Н.К. Дерев</i> Фано эффект, акустические фононы и квазиупругое рассеяние света в кристалле $\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3$	9
<i>А. А. Дмитриев</i> Высокочастотная проводимость в структурах p-Ge/SiGe в режиме квантового эффекта Холла: исследование методами акустической и микроволновой спектроскопии	11
<i>А.А. Жихорева</i> Исследование изменений морфологических параметров клеток <i>in vitro</i> при фотодинамическом воздействии методами цифровой голографии	12
<i>М.С. Котова</i> Импедансная спектроскопия резистивных переключений в композитных полимерных структурах с внедрением молекул фталоцианинов и нанопластинок CdSe	14
<i>В.Д. Курилович</i> Косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей, расположенных вблизи края двумерного топологического изолятора	16
<i>П.Д. Курилович</i> Косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей в двумерном топологическом изоляторе на основе квантовой ямы CdTe/HgTe/CdTe	17

<i>С.Ю. Лукашенко</i>	Измерение масс нанобиочастиц с помощью углеродного наноосциллятора	19
<i>П.В. Семенихин</i>	Спиновое упорядочение и низко температурный прыжковый транспорт в Ge:As вблизи фазового перехода изолятор–металл	20
<i>О.С. Соболева</i>	Генерация мощных наносекундных оптических импульсов на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs лазера-тиристора . . .	22
<i>А.С. Шепелев</i>	Формирование электрического поля в облученных кремниевых pin-структурах при температурах жидкого гелия	23

Стендовая сессия 26

<i>А.В. Белашов</i>	Разработка и апробация экспериментальной установки для детектирования механизмов роуминга в процессе фотодиссоциации молекул формальдегида	26
<i>Д.М. Бельтюкова</i>	Исследование фотофизических свойств фотосенсибилизатора Радахлорин и его способности генерировать синглетный кислород	27
<i>А.С. Берестенников</i>	Механизм резистивного переключения в композитных пленках полимер-графен (оксид графена)	29
<i>О.Е. Ермаков</i>	Управление спиновым моментом импульса поверхностных волн при помощи анизотропной метаповерхности	30
<i>Д.В. Жирихин</i>	Оптически тонкий преобразователь поляризации электромагнитных волн терагерцового диапазона на основе метаматериалов	32
<i>А.С. Залогина</i>	Диэлектрические наноантенны для управления излучением источников одиночных фотонов на базе NV-центров в наноалмазах	32
<i>Г.П. Зограф</i>	Резонансные неплазмонные наночастицы для эффективного оптического нагрева и нанотермометрии	34

<i>Д.А. Коных</i>	Случайные матрицы и бозонный пик в двумерных моделях стекол	35
<i>А.В. Коротченков</i>	Взаимодействие электронов с магнитными возбуждениями в разбавленных магнитных полупроводниках	37
<i>А. Н. Косарев</i>	Воздействие наночастиц Ag на фотолюминесценцию квантовых точек InAs в GaAs	38
<i>Н.А. Костина</i>	Оптическое связывание частиц над металлической подложкой	39
<i>И.В. Кочман</i>	Исследование кристаллов HgSe:Fe методом электронного парамагнитного резонанса	40
<i>К.Л. Кошелев</i>	Электромагнитные свойства низкодобротных оптических резонаторов	42
<i>О.А. Кошелев</i>	Генерация и релаксация напряжений при плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктур на основе (Al,Ga)N соединений	43
<i>В.А. Кравец</i>	Влияние коллоидного золота на люминесценцию Eu^{3+} в боросиликатных стеклах	45
<i>Д.И. Маркина</i>	Влияние электронного облучения и электрического поля на оптические спектры поглощения нанопористых стекол с наночастицами серебра	46
<i>Д.Д. Митина</i>	Исследование радиационной стойкости кремниевых детекторов излучения тяжелых ионов	48
<i>К.М. Морозов</i>	Эффект Парселла в оптических решетках Фибоначчи	49
<i>Н.С. Петрова</i>	Технологии получения и термоэлектрические свойства полупроводниковых высших силицидов переходных металлов .	50

<i>Н.Д. Прасолов</i>	
Моделирование методов молекулярной динамики модификации поверхности кристалла GaAs при наноиндентировании зондом атомно-силового микроскопа .	51
<i>З.Ф. Садриева</i>	
Высокодобротные микрорезонаторы на основе локализованных оптических состояний непрерывного спектра	52
<i>Е.Ю. Тигунцева</i>	
Усиление фотолюминесценции от гибридных перовскитов за счет нанесения кремниевых наночастиц	54
<i>Д.В. Царёв</i>	
Методы получения квантово-запутанных состояния Бозе- конденсатов экситон-поляритонов для прецизионных измерений	55

Электронная структура нанопроволок на основе селенида свинца

И.Д. Авдеев

Академический университет, Санкт-Петербург, Россия

Селенид свинца — широко распространенный материал в оптоэлектронике для инфракрасного диапазона. Это прямозонный полупроводник с узкой шириной запрещенной зоны, расположенной в четырёх неэквивалентных L долинах. В наноструктурах на его основе вырождение по долинам частично снимается за счёт анизотропии масс, а также за счёт смешивания различных долин на интерфейсах [1].

В последнее время появились экспериментальные работы, в которых описывается процесс создания проволок или наностолбиков из селенида свинца. Для описания свойств электронных и дырочных состояний в таких системах, как правило, используется $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ модель. Наиболее распространенный вариант — двухзонная модель Диммока, модификации которой используются до сих пор [2, 3].

Свойства размерно-квантованных состояний в проволоках исследованы в рамках двухзонной модели Диммока, с учетом точечной симметрии проволок. В качестве объекта исследования выбраны бесконечные нанопроволоки, выращенные в направлении $[111]$, так что одна из L долин направлена вдоль проволоки. Рассмотрено три типа проволок с точечной симметрией D_{3d} , D_3 и C_{2h} , каждая из которых является подгруппой группы волнового вектора в L долине.

Одним из методов теоретического изучения состояний в наноструктурах являются их симметричные свойства: выяснение неприводимых представлений, по которым преобразуются состояния, позволяет явно классифицировать различные комбинации долин для состояний в реальных наноструктурах. До сих пор детального анализа симметрии состояний в нанопроволоках с учётом многодолинной структуры состояний не проводилось.

Была аккуратно рассмотрена процедура поворота уравнения Шредингера в модели Диммока из одной долины в другую, в результате чего удалось установить симметричные свойства $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ решений с учётом многодолинной структуры. В результате детального рассмотрения нам удалось в явном виде построить из $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ решений в нанопроволоке в различных долинах комбина-

ции, являющиеся базисными функциями неприводимых представлений группы симметрии проволоки. Оказалось, что такая процедура дает результат, в точности согласующийся с численным расчетом в методе сильной связи [4].

Литература

- [1] A.N. Poddubny, M.O. Nestoklon, and S.V. Goupalov, *Phys. Rev. B*, **86**, 035324, (2012).
- [2] A.C. Bartnik, A.L. Efros, W.-K. Koh, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **82**, 195313, (2010).
- [3] S.V. Goupalov, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 6476–6479, (2013).
- [4] I.D. Avdeev and M.O. Nestoklon, *J. of Physics: Conference Series*, **769**, 012074 (2016).

Теория ударной ионизации в прямозонных полупроводниках и квантовых ямах

А.Н. Афанасьев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Явление ударной ионизации (УИ) в полупроводниках, состоящее в рождении электрон-дырочной пары в результате кулоновского взаимодействия высокоэнергетичного электрона проводимости с электронами валентной зоны, проявляется во многих устройствах современной электроники. Ввиду недостаточной разработанности микроскопической теории УИ большинство «инженерных» расчетов в настоящее время выполняются на основе упрощенных формул со свободно подгоняемыми параметрами. Наиболее «популярны» представления о квадратичной зависимости темпа УИ от превышения энергии налетающего электрона E над пороговой E_{th} , предложенной Келдышем ещё в 1959 г. [1].

В настоящей работе проведен микроскопический анализ процессов УИ в прямозонных полупроводниках и квантовых ямах (КЯ) на их основе. Для объемных полупроводников, в рамках 14-зонной модели представлен квантово-механический вывод и количественные оценки коэффициентов A и B в разложении темпа УИ по степеням $E - E_{th}$, $W_{3D} = \hbar/\tau = A(E - E_{th})^2 + B(E - E_{th})^3$. Показано, что квадратичный вклад возникает в меру подмешивания к волновой функции тяжелой дырки состояний далеких зон и является сильно анизотропным. В частности, квадратичный вклад исчезает, если инициирующий акт УИ электрон летит в направлениях $[100]$ и $[111]$. Для коэффициента B , характеризующего кубический вклад, получено выражение, которое в пределе $\Delta_{so} \gg E_g$ имеет вид, согласующийся с приведенным (без вывода) в работе [2]. Для оценки T^* , эффективной температуры кроссовера между двумя вкладами, мы приравняли интегральные темпы УИ, усредненные по направлению

электрического поля, предполагая для функции распределения горячих электронов $f(E) \sim \exp(-E/T)$. В результате $T^* = \frac{A}{3B} = \frac{16}{35} \frac{Q^4}{P^4} \frac{E_g^3}{E_G^2}$, где E_B^* — боровская энергия в зоне проводимости, E_G — расстояние между зонами c и c' (в точке Γ), P и Q — матричные элементы оператора импульса между блоховскими функциями зон $c-v$ и $c'-v$ соответственно. Для параметров InAs $T^* \approx 10$ К, соответственно при комнатной температуре квадратичный вклад в 50 раз меньше кубического. Из полученного выражения следует, что доминирование кубического вклада над квадратичным при $T = 300$ К ожидается для прямозонных полупроводников с $E_g \leq 1.5$ eV.

Расчет темпа УИ в КЯ ведется при условии, что горячие электроны оккупируют лишь первый уровень размерного квантования. Такая ситуация имеет место в двумерных структурах с глубокими КЯ AlSb/InAs_{1-x}Sb_x/AlSb [3]. В главном порядке по параметру $k_g a \ll 1$, $k_g = k(E_g)$ УИ в двумерии определяется взаимодействием налетающего электрона зоны проводимости с электронами, оккупирующими четные уровни размерного квантования в валентной зоне. В рамках шестизонной модели Кейна для темпа УИ в КЯ мы получили $\hbar W_{2D} = 3(2\pi)^3 \frac{E_B^*}{E_g} (ak_g)^{-4} (E - E_{th}^{2D})$. Таким образом, в результате снятия ограничений, накладываемых законом сохранения импульса на квантовую компоненту, зависимость темпа УИ от $E - E_{th}$ становится линейной, что отражает усиление процессов УИ в двумерных структурах. Это показывает, что применение наноструктур в приборах, использующих явление УИ, может существенно улучшить их характеристики.

Работа выполнена под руководством сотрудников сектора теоретической микроэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе Грешнова А.А. и Зегри Г.Г.

Литература

- [1] Л.В. Келдыш, ЖЭТФ **37**, 713 (1959).
- [2] B. Gelmont, K. Kim, M. Shur, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1280 (1992).
- [3] М.Р. Mikhailova *et al*, *J. Appl. Phys.* **115**, 223102 (2014).

Фано эффект, акустические фононы и квазиупругое рассеяние света в кристалле Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO₃

Н.К. Дерез

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Натрий-висмутовый титанат Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO₃ (NBT), принадлежит к семейству релаксорных сегнетоэлектриков со структурой перовскита (общая фор-

мула ABO_3). Структура и динамика решетки NBT является предметом горячих дискуссий на протяжении более чем 60 лет. Достоверно установлено изменение от кубической до тетрагональной симметрии при сегнетоэластическом фазовом переходе в окрестности 810 К. Поведение диэлектрических, акустических и других свойств NBT при сегнетоэластическом, релаксорном, сегнетоэлектрическом фазовых переходах демонстрирует ярко выраженные аномалии, природа которых до сих пор не установлена. Особый интерес вызывает поведение длинно-волновых акустических фононов в окрестности фазовых превращений в NBT. Это стимулировало нас на проведение экспериментов по мандельштам-бриллюэновскому рассеянию (МБР) света в широком температурном интервале.

В настоящей работе приведены результаты исследований гиперзвуковых акустических фононов в кристалле NBT с $q_{\text{ph}} \parallel [110]$ в температурном интервале 820–300 К. Измерения проводились в 90-градусной геометрии рассеяния с помощью многопроходного интерферометра Фабри–Перо. В качестве источника света служил твердотельный лазер с длиной волны 532 нм. Дополнительно к фоновым линиям (ТА и LA) в экспериментальных спектрах наблюдалось квазиупругое рассеяние света. Особое внимание привлекло искажение (асимметрия) фоновых линий, возникающая в окрестности возникновения релаксорного состояния. Эта асимметрия мод характерна для резонансных явлений, связанных с эффектом Фано. Полученные экспериментальные спектры рассеяния света в NBT хорошо описывались в рамках модели Фано. В результате обработки были получены температурные зависимости полуширины и восприимчивости квазиупругого рассеяния света, частоты, полуширины и восприимчивости поперечного и продольного акустических фононов и константы связи. Резонанс Фано в диэлектрических кристаллах предполагает наличие связи между поперечным акустическим (ТА) и оптическим (ТО) фононами. Наши результаты хорошо согласуются с данными экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов в NBT [1]. На основании корреляции температурных зависимостей полуширины квазиупругого рассеяния света и константы связи мы предполагаем, что релаксационная мода, проявляющаяся в наших экспериментах как квазиупругое рассеяние света участвует во взаимодействии ТА и ТО мод.

Литература

- [1] L. Cai, J. Toulouse, H. Luo, W. Tian. *Phys. Rev. B* **90**, 054118 (2014).

Высокочастотная проводимость в структурах p-Ge/SiGe в режиме квантового эффекта Холла: исследование методами акустической и микроволновой спектроскопии

А.А. Дмитриев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В режиме квантового эффекта Холла наблюдаются осцилляции диагональной компоненты ВЧ-проводимости в магнитном поле. В максимумах этих осцилляций носители заряда делокализованы. В делокализованных состояниях ВЧ-проводимость не зависит от частоты. В минимумах осцилляций в сильных магнитных полях носители заряда локализованы.

Для исследования механизма ВЧ-проводимости в локализованных состояниях необходимо измерять частотные зависимости ВЧ-проводимости. При этом чтобы избежать сложностей с подводом контактов к проводящему каналу, для определения ВЧ-проводимости удобно применять бесконтактные методики — акустическую и микроволновую спектроскопии [1].

Акустическая методика впервые была применена Виксфордом и коллегами [2] и представляет собой способ определения ВЧ-проводимости образца по коэффициенту затухания поверхностной акустической волны (ПАВ) и относительному изменению скорости звука. Она позволяет работать с частотами от 30 до 400 МГц.

Чтобы расширить этот диапазон до 1500 МГц, мы используем предложенную Энгелем и коллегами [3] методику микроволновой спектроскопии. В ней проводимость образца определяется по коэффициенту затухания волны в копланарном волноводе, на котором лежит образец. Однако из-за сложных процессов, происходящих с сигналом в линии (отражения и т.п.), этот метод сам по себе не позволяет получать абсолютную величину проводимости. Для её нахождения микроволновая методика калибруется по результатам, полученным при помощи акустической методики. В основе этой калибровки лежит утверждение о независимости проводимости в делокализованных состояниях от частоты — поэтому максимумы осцилляций проводимости, полученной из разных методик при разных частотах, должны совпадать.

Этот подход мы применили для исследования гетероструктуры p-Ge/SiGe с квантовой ямой Ge, выращенной Н. von Känel [4]. Активная часть образца представляет собой двумерный канал в напряжённом слое Ge. Основными носителями в нём являются тяжёлые дырки, концентрация которых при

$T = 4.2$ К равна $p = 4.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а подвижность — $\mu_p = 4.4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Полученные температурные и частотные зависимости ВЧ-проводимости в минимумах осцилляций позволили сделать вывод о том, что в локализованных состояниях дырок она имеет прыжковый характер и может быть описана двухузельной моделью [5].

Автор благодарит сотрудников лаборатории Дричко И.Л., Малыша В.А. и Смирнова И.Ю. за помощь, оказанную на каждом этапе исследования.

Литература

- [1] I.L. Drichko, A.M. Diakonov, V.A. Malysh, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **116** 154309-1–154390-7 (2014).
- [2] A. Wixforth, J.P. Kotthaus, G. Weimann, *Phys. Rev. Lett.* **56** 2104–2106 (1986).
- [3] L.W. Engel, D. Shahar, Ç. Kurdak, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **71** 2638–2641 (1993).
- [4] H. von Känel, M. Krummer, G. Isella, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **80** 2922–2924 (2002).
- [5] M. Pollak, T. Geballe, *Phys. Rev.* **122** 1742–1753 (1961).

Исследование изменений морфологических параметров клеток *in vitro* при фотодинамическом воздействии методами цифровой голографии

А.А. Жихорева

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию онкологических заболеваний и методам их лечения. Одним из таких методов является фотодинамическая терапия (ФДТ) [1]. В процессе фотодинамического воздействия происходит генерация синглетного кислорода, играющего важную роль во многих процессах, протекающих в живых организмах. Данная активная форма кислорода может индуцировать клеточную смерть путем апоптоза или некроза. Генерация синглетного кислорода может производиться, например, с помощью специальных веществ — фотосенсибилизаторов. Некоторые их гидрофобные формы, такие как Радахлорин [2], могут проникать в живую клетку через плазматическую мембрану и накапливаться во внутриклеточных структурах, преимущественно в лизосомах, митохондриях, и аппарате Гольджи [3]. Для детального изучения механизмов апоптоза и некроза необходимо исследовать динамику морфологических изменений, происходящих внутри клетки при фотосенсибилизированной генерации синглетного кислорода.

Методы цифровой голографии, основанные на анализе интерференционной картины опорной и предметной волн, позволяют восстановить форму

волнового фронта, прошедшего через исследуемые клетки. По полученным фазовым распределениям можно вычислить некоторые морфологические параметры клетки и проследить динамику их изменения в ходе какого-либо процесса [4]. Например, можно оценить объем, форму и распределение интегрального показателя преломления, и таким образом провести диагностику физиологического состояния организма. Так исследование изменения морфологических параметров клеток при фотосенсибилизированной генерации синглетного кислорода позволяет сделать выводы о внутриклеточных процессах [5].

Эксперименты проводились на культурах клеток карциномы человека HeLa (Российская коллекция клеточных культур Института цитологии РАН, С.-Петербург). Клетки культивировались в чашках Петри в среде DMEM, содержащей 10% сыворотки крови эмбрионов коровы и 1% пенициллин/стрептомицин, в атмосфере 5% CO₂ при 37 °C. Клетки растили до 60% монослоя. Непосредственно перед экспериментами по фотосенсибилизированной генерации синглетного кислорода исследуемые образцы выдерживались в среде, содержащей фотосенсибилизатор Радахлорин в концентрации 5 мкг/мл [2], в течение четырех часов. Затем производился мониторинг процесса накопления Радахлорина в живых клетках культуры HeLa с помощью конфокального флуоресцентного микроскопа Leica TCS SP5. В ходе воздействия на клетки лазерного излучения на длине волны 405 нм, находящейся в полосе поглощения фотосенсибилизатора, происходила генерация синглетного кислорода, приводящего к смерти клеток.

В ходе работы была проведена регистрация цифровых голограмм клеток HeLa при различных режимах фотодинамического воздействия и на разных длинах волн возбуждения фотосенсибилизатора. Полученные голограммы обрабатывались численными методами, основанными на Фурье анализе. Контрольные эксперименты показали, что используемые дозы излучения безвредны для клеток при отсутствии фотосенсибилизатора. По восстановленным фазовым распределениям были собраны статистические данные о значении среднего интегрального фазового набег волнового фронта, прошедшего через исследуемые клетки. В результате было установлено, что фазовый набег в клетке по мере ее гибели уменьшается, что, видимо, вызвано нарушением целостности мембраны клетки и частичным выходом содержимого клетки во внешнюю среду.

Автор благодарит А.В. Белашова, Т.Н. Беляеву, О.С. Васютинского, Е.С. Корнилову, Н.В. Петрова, А.В. Салову, И.В. Семенову за консультации и помощь при выполнении работы.

Литература

- [1] T.J. Dougherty *et al.*, *J. of the Nat. Cancer Inst.* **90** 167 (1996).
- [2] <http://www.radapharma.ru/produkcija/>
- [3] A.P. Castano, T.N. Demidova, M.R. Hamblin, *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, **1** 279 (2004)
- [4] A.V. Belashov, *et al.*, *Optics Lett.* **41** 5035 (2016)
- [5] B. Rappaz, *et al.*, *Cytometry Part A.* **73** 895 (2008)

Импедансная спектроскопия резистивных переключений в композитных полимерных структурах с внедрением молекул фталоцианинов и нанопластинок CdSe

М.С. Котова

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Развитие быстрых, компактных, дешевых устройств памяти является важной задачей современной электроники. В работе изучается резистивная память, которая является энергонезависимой, быстрой, долговечной — 3,5 месяца сохранение состояний и масштабируемой [1], обладает большим числом циклов перезаписи 10^5 . Использование органических материалов [2] позволяет значительно упростить технологию изготовления, возможно нанесение материалов из раствора, например, печать. Принцип работы резистивной памяти заключается в возможности системы переключаться между состояниями с разными сопротивлениями при приложении электрического поля. Резистивное переключение (РП) осуществляется между двумя или более состояниями, исходное непроводящее состояние обозначается как OFF, а конечное состояние с максимальной проводимостью как ON. Для изучения РП мы использовали коммерчески доступный полимер полистирол, для модификации свойств РП в полимерную матрицу добавлялись органические полупроводниковые частицы-фталоцианины лютеция [3] и коллоидные нанопластины CdSe (НП). Внедрение НП и фталоцианинов привело к увеличению стабильности РП и позволило наблюдать не только два крайних состояния, но и промежуточные состояния (рис. 1а) с помощью ограничения тока в цепи нагрузочными сопротивлениями различной величины. Для всех промежуточных состояний были сняты импеданс-спектры (рис. 1б). Они представляют собой единичные полуокружности, сдвинутые от начала координат. Такой вид импедансных

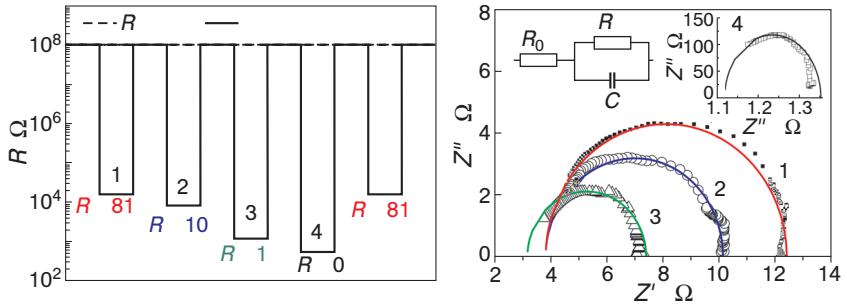


Рис. 1. (а) РП в сэндвич-образце из полистирола, производной фталоцианина лютеция и нанопластинок CdSe между состояниями OFF, промежуточными и ON при ограничении тока различными нагрузочными резисторами R_l (81 кОм, 10 кОм, 1 кОм, 0). (б) Зависимость мнимой величины импеданса от действительной в том же образце.

спектров описывается эквивалентной схемой, представленной на вставке к рисунку 1b. Были определены параметры этой схемы R_c , R_0 , C , $R_{total} = R_c + R_0$ для всех изученных состояний. В промежуточных состояниях с сопротивлением R_{total} 12,4, 10,15, 7,4 кОм значения R_0 и C значительно не меняются. В состоянии ON с $R_{total} = 2.3$ кОм, значение R_0 уменьшается в 2 раза, а значение емкости C увеличивается более чем в 3 раза. Это объясняют эффектом Максвелла–Вагнера (М–В) — появлением неоднородностей в структуре. В нашей системе эффект может быть связан с ростом металлических или углеродных проводящих каналов [2]. В промежуточных состояниях возникают единичные проводящие каналы, которые не влияют на емкость структуры. В ON состоянии возникает сложная система проводящих каналов, которые и являются неоднородностью. Так, с помощью импеданс-спектроскопии нам удалось наблюдать за ростом проводящих каналов.

Мы продемонстрировали, что композитный материал из нанопластинок CdSe, внедренных в органическую матрицу, является перспективным материалом для изучения эффекта резистивного переключения и создания резистивной памяти. Работа была поддержана проектами РФФИ № 16-07-00961, 15-03-05890, 16-33-60005. Автор выражает благодарность К.А. Дроздову, Е.А. Кузьминой, Т.В. Дубининой, Р.Б. Васильеву и Л.Г. Томиловой в предоставлении материалов и помощи в проведении экспериментов.

Литература

- [1] M.S. Kotova, M.A. Dronov, A.V. Rzhavskiy, *et al.*, *Organic Photonics and Photovoltaics*, **4**, 1 17–23 (2016).
- [2] F. Pan *et al.*, *Materials Science and Engineering R*, **83** 1 (2014).
- [3] M. Dronov, I. Belogorokhov, M. Kotova, *MRS Proceedings*, 1729 (2015) .

Косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей, расположенных вблизи края двумерного топологического изолятора

В.Д. Курилович

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

В последнее время, большой экспериментальный и теоретический интерес прикован к двумерным топологическим изоляторам, наиболее известным представителем которых является квантовая яма $\text{CdTe}/\text{HgTe}/\text{CdTe}$ с шириной $d > 6.3 \text{ nm}$. Одна из основных особенностей таких материалов — наличие бесщелевых состояний с Дираковским спектром, локализованных на краю образца. Из-за сильной спин-орбитальной связи, проекция спина этих состояний на ось, перпендикулярную к плоскости топологического изолятора, связана с направлением их движения. В отсутствии возмущений, нарушающих симметрию по отношению к обращению времени, это приводит к идеальной одномерной проводимости вдоль края. В связи с этим, возникает интерес к изучению классических магнитных примесей, расположенных недалеко от края, которые такую симметрию нарушают.

При низких температурах, влияние магнитных примесей на проводимость зависит от того, в какой магнитной фазе они находятся. Для того, чтобы изучить возможные фазы, необходимо понять, как устроено взаимодействие между примесями. Основной механизм такого взаимодействия при достаточно малых концентрациях — косвенный обмен.

В ближайшее время, косвенное обменное взаимодействие в топологических изоляторах привлекло большое теоретическое внимание. В частности, подробно изучен вопрос о косвенном взаимодействии между примесями, расположенными глубоко в толще образца [1], а также вопрос о косвенном обменном взаимодействии между примесями, расположенными в точности на краю [2].

В данной теоретической работе показано, что косвенное обменное взаимодействие между магнитными примесями, расположенными недалеко от края двумерного топологического изолятора, может быть разбито на три вклада: вклад за счет объемных состояний, который оказывается основным, когда примеси расположены далеко от края, вклад за счет краевых состояний, который превалирует в случае, когда обе примеси расположены вблизи края, а также вклад за счет интерференции между объемными и краевыми состояниями, который оказывается основным, когда одна из примесей находится на краю, а другая — вдали от него. Объемная часть взаимодействия спадает

экспоненциальным образом по мере разнесения примесей. Это находится в соответствии с общими ожиданиями [3]. Краевая часть демонстрирует поведение, типичное для одномерного металла: осцилляции с периодом π/k_F , где k_F — фермиевский волновой вектор краевых состояний, а также степенное затухание. При этом взаимодействуют только компоненты спинов примесей, лежащие в плоскости топологического изолятора.

Основной результат работы — изучение интерференционного вклада в косвенное обменное взаимодействие. Было показано, что оно затухает экспоненциально с расстоянием, и характерный масштаб затухания явным образом зависит от положения химического потенциала: он расходится при приближении химического потенциала к краю запрещенной зоны. Кроме того, спиновая структура интерференционного взаимодействия содержит слагаемые, связывающие перпендикулярные к плоскости топологического изолятора компоненты спинов примесей. Эта особенность приводит к тому, что при наличии магнитной анизотропии типа легкая ось, такой тип взаимодействия может оказаться важнее обмена через краевые состояния даже для примесей, расположенных на краю.

Автор выражает благодарность П.Д. Куриловичу и И.С. Бурмистрову за совместную работу над проектом. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-52-06005.

Литература

- [1] P.D. Kurilovich, V.D. Kurilovch, I.S. Burmistrov, *Phys. Rev. B* **94** 155408 (2016).
- [2] Yu-W. Lee, Yu-L. Lee, I *Phys. Rev. B* **91** 214431 (2015).
- [3] N. Bloembergen, T.J. Rowland, *Phys. Rev.* **97** 1679 (1955).

Косвенное обменное взаимодействие магнитных примесей в двумерном топологическом изоляторе на основе квантовой ямы CdTe/HgTe/CdTe

П.Д. Курилович

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

Двумерные топологические изоляторы в последнее время вызывают большой интерес с теоретической и экспериментальной точки зрения. Особенностью таких систем является наличие одномерных краевых состояний, спин которых напрямую связан с импульсом. В пренебрежении взаимодействием между электронами такие краевые состояния обеспечивают идеальную проводимость вдоль края, устойчивую к присутствию немагнитных примесей и дру-

гих возмущений, не разрушающих симметрию по отношению к обращению времени. Наличие магнитного порядка в образце может, однако, приводить к подавлению проводимости вдоль края. Поэтому для описания транспортных свойств при наличии магнитных примесей в топологическом изоляторе необходимо понимать, как устроена фазовая диаграмма этой магнитной системы. Оказывается, что при небольших концентрациях примесей и низких температурах упорядочение определяется косвенным обменным взаимодействием между магнитными примесями.

В данной работе аналитически рассмотрена задача о косвенном обменном взаимодействии двух магнитных примесей в двумерной квантовой яме CdTe/HgTe/CdTe выращенной вдоль направления (001) в случае, когда химический потенциал лежит в щели спектра. Такая квантовая яма — один из первых примеров двумерного топологического изолятора, реализованный экспериментально. Электроны в квантовой яме были рассмотрены в рамках расширенной модели ВНЗ [1], учитывающей инверсионную асимметрию интерфейсов квантовой ямы. В пренебрежении асимметрией гамильтониан ВНЗ представляет собой блочную матрицу и имеет двукратно вырожденный спектр с щелью [2]. Учет несимметричности приводит к появлению межблочных матричных элементов и расщеплению спектра.

Взаимодействие электронов с примесями было проанализировано с использованием метода эффективной массы и считалось контактным.

Расчет косвенного обменного взаимодействия магнитных примесей был выполнен с использованием стандартной диаграммной техники. Было выяснено, что в соответствии с общими ожиданиями [3], энергия взаимодействия магнитных примесей экспоненциально падает по мере удаления примесей друг от друга, когда химический потенциал находится в щели спектра. Менее очевидным результатом является тот факт, что инверсионная асимметрия приводит к медленным осцилляциям взаимодействия с расстоянием. Одной из других важных особенностей полученного гамильтониана взаимодействия является нетривиальная спиновая структура: в нем помимо слагаемых с высокой симметрией, таких как взаимодействие Гейзенберга, Изинга или Дзялошинского–Мории, присутствуют и более сложные слагаемые, характеризующиеся отсутствием вращательной инвариантности в плоскости квантовой ямы. Стоит также отметить зависимость знака некоторых слагаемых в гамильтониане взаимодействия примесей от топологической фазы квантовой ямы. Оценка масштабов задачи на основе данных из [4], приводит к длине затухания взаимодействия около 20 нм.

Автор выражает благодарность В.Д. Куриловичу и И.С. Бурмистрову за совместную работу над проектом. Работа выполнена при поддержке гранта

Литература

- [1] S.A. Tarasenko, M.V. Durnev, M.O. Nestoklon, *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 081302 (2015)
- [2] B.A. Bernevig, T.L. Hughes, and S.-C. Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006)
- [3] A.A. Abrikosov, *Adv. Phys.* **29**, 869 (1980)
- [4] Xiao-Liang Qi and Shou-Cheng Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011)

Измерение масс нанобиочастиц с помощью углеродного наноосциллятора

С.Ю. Лукашенко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Для измерения массы макрообъектов можно воспользоваться обычными весами или измерить объём объекта и затем умножить на его плотность. Однако, для малых частиц сложной формы не всегда удастся точно измерить объём. Кроме того, плотность нанообъекта из-за большой удельной доли поверхности может отличаться от плотности макрообъекта. Поэтому массу субмикронных частиц, включая нанобиообъекты, измеряют с помощью специальных резонансных детекторов массы (РДМ) на основе наномеханических осцилляторов (НМО). При этом НМО нагружают наночастицей и измеряют возникающий под действием добавленной массы сдвиг его резонансной частоты. Для резонансного взвешивания микрочастиц с массой ($10^{-7} - 10^{-12}$) г используют коммерчески доступные кремниевые микрокантилеверы [1,2], применяемые обычно в атомно-силовой микроскопии (АСМ). В работе [2] с помощью микрокантилеверов была измерена масса золотой частицы диаметром 0,9 мкм на уровне 60×10^{-12} г. Для измерения сверхмалых масс в качестве НМО используют углеродные нанотрубки с поперечным сечением ~ 5 нм и собственной массой $\sim 10^{-20}$ г. В работе [3] с помощью углеродных нанотрубок, удалось в условиях сверхвысокого вакуума измерить массу отдельных атомов золота $\sim 10^{-22}$ г. Для измерения промежуточных масс ($10^{-14} - 10^{-18}$) г, например, используют специальные кремниевые микро- и нанобалки, изготовленные с помощью планарных литографических методик. В работе [4] с помощью микрокантилевера толщиной 30 нм и массой $\sim 10^{-15}$ г была измерена масса вируса оспавакцины на уровне $9,5 \times 10^{-15}$ г. Для того, чтобы осциллятор имел высокую чувствительность необходимо обеспечить достаточно высокую механическую жесткость, резонансную частоту и добротность. Кроме того, в случае взвешивания биообъектов необходимо обеспечить сохранение достаточно высокой чувствительности при атмосферном

давлении. Вообще говоря, при атмосферном давлении НМО должен терять энергию на трение о воздух, и, его добротность и, как следствие, чувствительность должны уменьшаться. Однако в работах [5,6] теоретически показано, что, если характерный размер осциллятора меньше длины свободного пробега молекул газа, то реализуется свободномолекулярный режим, и трением о воздух можно пренебречь. В [7] мы экспериментально продемонстрировали, что НМО в виде углеродных вискеро́в с толщиной ~ 100 нм имеют одинаковую добротность в вакууме и при атмосферном давлении. На наш взгляд, перспективными с точки зрения перечисленных выше критериев являются детекторы массы на основе углеродных вискеро́в длиной ~ 3 мкм, толщиной ~ 100 нм и собственной массой $(10^{-15} - 10^{-14})$ г. К тому же технология осаждения под действием фокусированного электронного пучка позволяет создавать захваты разных форм на кончике наноосциллятора, что упрощает закрепление наночастиц. Данная работа посвящена созданию таких НМО, манипулированию наночастицами под действием электронного и лазерного пучка и экспериментальному измерению сдвига резонансной частоты от массы наночастиц в вакууме и при атмосферном давлении. Подобные НМО являются перспективной платформой для исследования различных объектов, включая объекты биологической природы, в диапазоне масс $(10^{-18} - 10^{-14})$ г.

Литература

- [1] B. Ilic, D. Czaplewski, C. Campagnolo, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 450 (2000).
- [2] S. Dohn, R. Sandberg, A. Boisen, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 233501 (2005).
- [3] K. Jensen, K. Kwanpyo, A. Zettl, *Nature nanotechnology* **3** 533-537 (2008).
- [4] A. Gupta, D. Akin, R. Bashir, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1976 (2004).
- [5] D. Karabacak, V. Yakhot, K. Ekinci, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 254505 (2007).
- [6] R. Bhiladvala, Z. Wang, *Phys. Rev. (E)* **69**, 036307 (2004).
- [7] S. Lukashenko, I. Mukhin, A. Veniaminov, *Phys. stat. sol. (a)* **213**, 2375–2379 (2016).

Спиновое упорядочение и низко температурный прыжковый транспорт в Ge:As вблизи фазового перехода изолятор—металл

П.В. Семенихин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Получение магнитоупорядоченных состояний в немагнитных материалах является одной из задач современной физики конденсированных сред. В этой

области были достигнуты результаты для наноструктурированных углеродных материалов [1], а также материалов с большой плотностью дефектов [2]. Однако сложность таких объектов для исследования, оставляет открытым вопрос о природе возникновения магнитного порядка.

Сравнительно недавно в компенсированных образцах Ge:As в области фазового перехода ИМ был обнаружен переход от «антиферромагнитного» к «ферромагнитному» спариванию спинов при достаточно низких температурах [3,4]. Учитывая «технологичность» и хорошую изученность данного материала это позволяет выбрать его в качестве модельного для исследования механизмов образования магнитоупорядоченных состояний в немагнитных материалах.

Для серии образцов компенсированного Ge:As, в которой наблюдалось возникновение магнитоупорядоченных состояний, был произведен анализ температурных зависимостей парамагнитной восприимчивости и прыжковой проводимости.

Установлено, что при относительно высоких температурах ($T > 20$ К) электропроводность определяется свободными электронами в зоне проводимости, спины не взаимодействуют между собой, их концентрация постоянна, а парамагнитная восприимчивость подчиняется закону Кюри.

В области низких температур $T \leq 20$ К имеет место прыжковый транспорт по локализованным состояниям примесной зоны. В этой области температур прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка по состояниям кулоновской щели для сильно компенсированных образцов имеет вид $\sigma \sim T^{-0.5}$. С уменьшением компенсации и приближении к критической точке перехода ИМ экспоненциальная температурная зависимость ослабляется и постепенно трансформируется в степенную. В этой же области температур, температурная зависимость парамагнитной восприимчивости выполаживается, отклоняясь от закона Кюри. Спины начинают взаимодействовать, образуясь в пары с антипараллельной ориентацией. При этом, закон Кюри переходит в закон Кюри–Вейсса с отрицательной постоянной Θ .

При достаточно низких температурах $T < 8$ К наблюдается ослабление температурной зависимости энергии активации локализованных электронов. В этой же области температур происходит переход от антипараллельного к параллельному спариванию спинов. Такой переход сопровождается трансформацией структуры электронной волновой функции из s- в p-состояние.

Литература

- [1] F.J. Owens, *Physics of Magnetic Nanostructures*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2015.

- [2] Yu Liu, Gang Wang, Shunchong Wang, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 087205 (2011).
- [3] A.G. Zabrodskii, A.I. Veinger, T.V. Tisnek, *et al.*, *Appl. Magn. Res.* **35**, 439 (2009).
- [4] A.I. Veinger, A.G. Zabrodskii, T.L. Makarova, *et al.*, *JhETP* **116**, 796 (2013).

Генерация мощных наносекундных оптических импульсов на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs лазера-тиристора

О.С. Соболева

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Разработан новый подход в генерации мощных оптических импульсов в полупроводниковых лазерах на основе гетероструктуры лазера-тиристора. В отличие от традиционных способов, где накачка полупроводниковых лазеров осуществляется с помощью внешнего импульсного источника тока, лазер-тиристор не требует внешней импульсной накачки за счет интеграции токового ключа с лазерной гетероструктурой. Такой подход имеет преимущества с точки зрения компактности, энергоэффективности, так же за счет непосредственной близости токового генератора снижаются паразитные индуктивности в цепи. Полученные в [1] и [2] результаты демонстрируют возможность применения нового подхода для создания мощных и компактных импульсных излучателей.

В [3] описана динамическая модель лазера-тиристора и показано, что прибор можно представить как оптопару лазерный диод–фототранзистор с нелинейной положительной обратной связью. Модель лазера-тиристора основана на уравнениях дрейфо-диффузионного транспорта и Пуассона, которые дополнены уравнением внешней цепи. Учитывается отрицательная дифференциальная подвижность электронов в GaAs описанная в [4], а так же модель ударной ионизации Зельберхерра.

Проведено моделирование различных конструкций прибора, показана возможность получения импульсов тока наносекундной длительностью с амплитудой выше 10 А и временем нарастания импульса 1 нс. Показано, что существенное влияние на режим работы прибора и его эффективность играют процессы ударной ионизации и формирования анодного домена.

Для генерации импульсов наносекундной длительности необходима оптимизация структуры лазера-тиристора с целью повышения максимального напряжения удержания с сохранением высокой скорости переходных процессов [5]. Была предложена структура с расширенной низколегированной ба-

зовой областью, в которой возможна генерация импульсов тока с фронтами включения и выключения около 1нс, длительностью 2нс и амплитудой 15 А.

В лазере-тиристоре возможна реализация эффекта модуляции добротности за счет локализации тока. В данном режиме экспериментально продемонстрирована генерация импульсов длительностью до 90пс и мощностью в 1.6 Ватт [6]. За счет увеличения толщины активной области до 100 нм при сохранении фактора оптического ограничения возможна эффективная генерация одиночного лазерного импульса, в [7] расчет динамики лазерной генерации продемонстрировал возможность получения импульсов амплитудой выше 40 Вт и длительностью 80пс в оптимизированной гетероструктуре.

Литература

- [1] S.O. Slipchenko, *et al.*, *IEEE Photonics Technology Lett.* **25** 1664–1667 (2013).
- [2] S.O. Slipchenko, *et al.*, *IEEE Photonics Technology Lett.* **27** 307–310 (2015).
- [3] S.O. Slipchenko, V.S. Yuferev, A.A. Podoskin, *et al.*, *Electron Devices* **62**, 4091–4096 (2015).
- [4] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, V. Palankovski, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 062114 (2008).
- [5] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, *et al.*, *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXIV Proc. SPIE*, **9742** 97420I (2016).
- [6] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, O.S. Soboleva, *et al.*, *Opt. Express* **24** 16500–16511 (2016).
- [7] O.S. Soboleva, A.A. Podoskin, V.S. Yuferev, *et al.*, *Proc. Int. Conf. Laser Optics*, R3-39 (2016).

Формирование электрического поля в облученных кремниевых рпн-структурах при температурах жидкого гелия

А.С. Шепелев

Академический университет, Санкт-Петербург, Россия

В крупнейших современных ускорителях элементарных частиц траектории пучков частиц формируются магнитным полем, создаваемым сверхпроводящими магнитами.

Может возникнуть ситуация, когда частицы пучка из-за взаимодействия с посторонними объектами попадут в обмотку магнита и вызовут локальный нагрев, что приведет к срыву сверхпроводимости и выходу из строя ускорителя. Поэтому для обеспечения своевременной безопасности системы возникает

задача регистрации излучений непосредственно вблизи обмоток, то есть при температурах жидкого гелия.

Для её решения было предложено использовать кремниевые детекторы излучений в виде *pin*-структур. Ожидалось, что при предельно низких температурах в слаболегированном *i*-слое все мелкие донорные примеси будут заполнены электронами и объемный заряд будет равен нулю. Поэтому при приложении внешнего смещения электрическое поле в объеме будет однородным. В таких условиях, полупроводник должен вести себя как изолятор, что оптимально для собирания заряда, генерированного попавшей в его объем частицей [1].

Для проверки этого утверждения был поставлен эксперимент по так называемому методу переходного тока. В объем обратно-смещенного *pin*-детектора лазерным импульсом инжектируются носители заряда, которые под действием поля собираются на электродах. Дрейф неравновесных носителей заряда создает токовый импульс. Анализ импульсов тока, полученных при различных параметрах (температура среды, в которой находится детектор, частота повторения лазерных импульсов, величина обратного смещения) позволяет восстановить распределение поля в объеме полупроводника и получить информацию об объемном заряде [2].

Результат данного эксперимента выявил противоречие с ожиданиями. Оказалось, что при любых температурах, в том числе и при гелиевых, в полупроводнике присутствует объемный заряд. Мелкие доноры обмениваются электронами с зоной проводимости. Более того, концентрация заряженных мелких доноров не зависит ни от температуры, ни от степени инжекции (за исключением очень высокого уровня инжекции).

Другим фактором, влияющим на формирование электрического поля в детекторе, является присутствие в его объеме глубоких примесных центров, связанных с облучением кремниевого кристалла частицами высоких энергий. Глубокие центры в полупроводнике могут захватывать свободные носители заряда и являться центрами рекомбинации. Таким образом, глубокие центры могут быть как заряженными, так и нейтральными. То есть вносить вклад в объемный заряд и в распределение электрического поля в объеме. Экспериментально было показано, что при сильном облучении при температурах жидкого гелия в детекторе собирается всего около 1% генерированного заряда.

Нами была построена теоретическая модель протекания постоянного электрического тока, генерируемого пучком протонов, в сильно облученном кремниевом кристалле с одним эффективным глубоким донорным и одним эффективным глубоким акцепторным уровнями (концентрация глубоких центров

много больше концентрации мелких доноров) при предельно низких температурах. Показано, что в такой модели возможно аналитическое решение уравнений, описывающих работу детектора. Результаты решения обсуждаются в связи с планами создания приборов для мониторингирования работы магнитов БАК.

Литература

- [1] E. Verbitskaya, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* **514**, 47–61, (2003).
- [2] Z. Li, C.J. Li, V. Eremin, E. Verbitskaya, *Nucl. Instr. and Meth. A* **388**, 297–307, (1997).

Стендовая сессия

Разработка и апробация экспериментальной установки для детектирования механизмов роуминга в процессе фотодиссоциации молекул формальдегида

А.В. Белашов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Молекула формальдегида играет важную роль в экологии, химии атмосферы и в астрофизике. Кроме того H_2CO традиционно является эталонной моделью четырехатомной молекулы. На сегодняшний день возможные каналы фотодиссоциации, а также динамика химических превращений этой молекулы, достаточно хорошо изучены [1, 2]. Ряд работ был посвящен исследованию механизма роуминга [3, 4], однако до настоящего времени были исследованы только его скалярные свойства, в то время как исследования векторных корреляций не применялись.

Данная работа посвящена разработке и апробации экспериментальной установки для детектирования механизмов роуминга в ходе фотодиссоциации молекул формальдегида [5], а также исследования корреляции между вектором поляризации электромагнитной волны индуцирующей фотодиссоциацию и вектором разлета фотофрагментов. Для определения симметрии радиационных переходов и коэффициентов анизотропии будет осуществлена фотодиссоциация молекул формальдегида линейно поляризованным излучением, а затем ионизация одного из образующихся фрагментов. С помощью системы электронных линз образующиеся ионы будут направлены на позиционно чувствительный детектор. Фотоионизация фотофрагментов молекул CO осуществляется на длине волны 329 нм, посредством многофотонной резонансной ионизации (REMPI 2+1). Образование формальдегида в газовой фазе будет осуществлено посредством нагрева кристаллов параформальдегида до 90–100 °С. Для устранения воды из экспериментальной установки будет введен дополнительный фильтр, содержащий сульфат магния.

В ходе данной работы была собрана экспериментальная установка и проведена ее апробация. Для этого монооксид углерода был смешан с гелием

при общем давлении 2 бар. Затем производилась многофотонная резонансная ионизация молекул СО в молекулярном пучке с помощью перестраиваемого лазера на длинах волн в диапазоне 230,06–230,08 нм. В результате анализа разрешенного во времени сигнала полученного на детекторе ионов удалось разделить ионы монооксида углерода от ионов других молекул, содержащихся в кювете, что позволило зарегистрировать спектр многофотонной резонансной ионизации СО. В дальнейшей работе планируется зарегистрировать сигнал от ионов монооксида углерода, полученных в результате фотодиссоциации формальдегида посредством механизмов роуминга и прямой фотодиссоциации и определить коэффициент анизотропии углового распределения фотофрагментов.

Автор благодарит Васютинского О.С., Shiun-Jr. Yang, King-Chuen Lin за консультации и помощь при выполнении работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта МНТ_а 16-53-52039.

Литература

- [1] R.D. van Zee, *et al.*, *J. Chem. Phys.* **99** 1664 (1993)
- [2] T.J. Butenhoff, *et al.*, *J. Chem. Phys.* **94** 1947 (1991)
- [3] S.A. Lahankar *et al.*, *J. of Chem. Phys.* **125** 044303 (2006)
- [4] A.C. Terentis *et al.*, *J. of Chem. Phys.* **108** 3187 (1998)
- [5] D. Townsend *et al.*, *Science* **306** 1158 (2004)

Исследование фотофизических свойств фотосенсибилизатора Радахлорин и его способности генерировать синглетный кислород

Д.М. Бельтюкова

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Кислород — один из важнейших элементов на Земле, который имеет немало интересных особенностей, в частности его основное состояние является триплетным. Первое возбужденное состояние кислорода – синглетное, которое играет большую роль в биологических системах. Так как прямой переход из основного триплетного состояния в возбужденное синглетное запрещен правилами отбора, для генерации синглетного кислорода используют специальные вещества — фотосенсибилизаторы (ФС). Одним из терапевтических способов использования фотосенсибилизированной генерации синглетного кислорода является фотодинамическая терапия. Суть фотодинамической терапии заключается во введении в пораженную область ФС и последующим ее облучением лазерным излучением с длиной волны, соответствующей

полосе поглощения ФС. Возбужденные молекулы ФС приводят к генерации синглетного кислорода, который и убивает клетку.

Мы исследовали препарат российского производства — органический ФС Радахлорин [1], который широко применяется в клинической практике. Данный ФС имеет две основных полосы поглощения с максимумами в районе 405 и 660 нм. Полоса флуоресценции имеет максимум в районе 662 нм. В экспериментах исследовался водный раствор Радахлорина.

В результате работы были получены данные, характеризующие основные фотофизические свойства Радахлорина и его способность генерировать синглетный кислород.

Было показано, что интенсивность и кинетика флуоресценции различаются для препаратов с разными датами производства. Было исследовано два препарата, 2014 и 2015 годов выпуска, которые возбуждались непрерывным полупроводниковым лазером с длиной волны 405 нм. Было показано, что сигнал флуоресценции раствора на препарате 2015 года выше и при этом спадает быстрее, чем сигнал на препарате 2014 года. Также было проведено исследование зависимости кинетики флуоресценции от концентрации кислорода, растворенного в растворе. Для раствора на препарате 2015 года не наблюдалась никакой зависимости от концентрации кислорода, а в растворе на препарате 2014 года наблюдалось уменьшение времени спада флуоресценции при увеличении концентрации кислорода. Это может быть вызвано тем, что даже при правильном хранении внутри ампулы с Радахлорином происходят химические реакции. Кроме того для обоих препаратов в одинаковых условиях были проведены исследования кинетики флуоресценции при различных концентрациях Радахлорина [2]. Было показано, что в обоих случаях при уменьшении концентрации ФС уменьшается сигнал и время спада флуоресценции, при этом зависимость от концентрации кислорода не меняет свой характер.

Были построены спектры люминесценции водного раствора Радахлорина при возбуждении непрерывными лазерами с длинами волн 405 и 660 нм в диапазонах 500–1300 и 670–1300 нм, соответственно. Был показан пик синглетного кислорода на фоне люминесценции ФС, определен его вклад в общий сигнал, а также было показано, что спектры при возбуждении на данных длинах волн имеют одинаковый характер. Кроме того были проведены эксперименты по исследованию зависимости сигнала фосфоресценции синглетного кислорода от концентрации ФС в растворе. Было показано, что при увеличении концентрации ФС до значения порядка $6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-3}$ для раствора возбуждаемого на длине волны 405 нм происходит насыщение, при возбуждении излучением с длиной волны 660 нм выход сигнала на постоянное значение не наблюдался даже при концентрации $6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-3}$, что обуславливается

более слабым поглощением на данной длине волны. Также была изучена зависимость генерации синглетного кислорода от концентрации растворенного в воде кислорода. При увеличении концентрации кислорода происходил рост сигнала фосфоресценции синглетного кислорода, затем после некоторой концентрации наблюдалось насыщение.

Выражаю огромную благодарность О.С. Васютинскому, В.П. Белику и И.В. Семенову за участие в исследовании.

Литература

- [1] <http://www.radapharma.ru/info.php>.
- [2] D.M. Beltukova, *et al.*, *Chem. Phys. Lett.*, **662**, 127–1317 (2016).

Механизм резистивного переключения в композитных пленках полимер–графен (оксид графена)

А.С. Берестенников

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Академический университет, Санкт-Петербург, Россия

Композитные (органика–неорганика) материалы вызывают большой интерес в связи с перспективами их применения в качестве энергонезависимых запоминающих устройств, обладающих высоким быстродействием, большой плотностью хранения информации, малым энергопотреблением и низкой себестоимостью [1]. В таких материалах на основе неорганических наночастиц, встроенных в полимерную матрицу, наблюдаются эффекты резистивного переключения, проявляющиеся в резком переходе образцов из низкопроводящего в высокопроводящее состояние при подаче электрического смещения на электроды. В последние годы наряду с композитами на основе полимеров и неорганических наночастиц большое внимание уделяется перспективным композитным материалам на основе частиц графена (Gr) и оксида графена (GO), внедренных в матрицу полупроводниковых и диэлектрических полимеров, так как Gr и GO являются эффективными средами для накопления носителей заряда [2,3].

Были исследованы эффекты переключения проводимости на постоянном токе в композитных структурах на основе полифункциональных полимеров: производных карбазола (PVK), флуорена (PFD) и поливинилхлорида (PVC), содержащих частицы Gr и GO при их концентрациях в полимерной матрице ~1–3 wt.%, а также рассмотрена окислительно-восстановительная природа этих эффектов [4,5]. Установлено, что эффект переключения в структурах

вида Al/PVK(PFD;PVC):GO(Gr)/ITO/PET проявляется в резком изменении сопротивления композитной пленки из низкопроводящего в относительно высокопроводящее состояние при подаче смещения на Al-ITO-электроды $\sim 0.1-0.3$ V ($E \sim 3-5 \cdot 10^4$ V/cm), что ниже пороговых напряжений переключения для других подобных композитов. В структурах Au/PVK(PFD;PVC)/Gr(GO)/ITO/PET при подаче импульса напряжения наблюдается резкий скачок проводимости, характеризующийся S-образными вольт-амперными характеристиками при наличии гистерезиса, при этом время переключения составляет $t \sim 1-30$ μ s [6]. Были проведены циклические вольтамперметрические измерения пленок PVK:Gr(GO), из которых было установлено, что потенциал окислительно-восстановительного перехода Gr/GO лежит в интервале напряжений, при которых происходят переключения образцов. Таким образом, наблюдаемые эффекты переключения могут быть объяснены влиянием окислительно-восстановительных реакций в частицах Gr и GO, заключенных в матрицу полимера, при дополнительном влиянии термомеханических свойств полимерной составляющей композита.

Данные структуры могут быть использованы для создания быстродействующих транзисторов с эффектом памяти [7].

Литература

- [1] T.A. Skotheim, J.R. Reynolds. *Handbook of conducting polymers* 3rd ed. CRC Press, NY. (2007). P. 620.
- [2] W.P. Lin, S.J. Liu, T. Gong, *et al.* Adv. Mater. **26** 570 (2014)
- [3] J.R. Potts, D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, *et al.* Polymer **52** 5 (2011)
- [4] A.N. Aleshin, P.S. Krylov, A.S. Berestennikov, *et al.* Synth. Met. **217** 7 (2016)
- [5] П.С. Крылов, А.С. Берестенников, А.Н. Алешин и др. ФТТ **57** 1639 (2015)
- [6] П.С. Крылов, А.С. Берестенников, Фефелов С.А. и др. ФТТ **58**, 2476 (2016).
- [7] A.N. Aleshin, I.P. Shcherbakov, A.S. Komolov, *et al.* Org. Electron. **16** 186 (2015)

Управление спиновым моментом импульса поверхностных волн при помощи анизотропной метаповерхности

О.Е. Ермаков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Основными характеристиками электромагнитной волны являются энергия, импульс и момент импульса, который определяется суммой спиновой и орбитальной составляющих. Эти фундаментальные характеристики волн связаны с поляризацией и пространственным распределением электромагнитного поля.

Если у поля отсутствует выделенное направление аксиальной симметрии (как у плоских и поверхностных волн), то корректно определена только спиновая составляющая момента импульса. Для плоских волн спиновый момент импульса всегда коллинеарен или антиколлинеарен волновому вектору. Для поверхностных волн, например для поверхностного плазмон-поляритона, спиновая компонента момента импульса всегда поперечна, то есть перпендикулярна направлению распространения волны [1]. Таким образом, и для плоских, и для эванесцентных волн имеется устойчивая жесткая связь между направлением спина и направлением волнового вектора волны [2], которая проявляется в спин-зависимых эффектах взаимодействия света с веществом [3–5].

В этой работе показано, что связь между направлением спина и направлением волнового вектора может нарушаться для особого класса поверхностных волн, распространяющихся вдоль анизотропных метаповерхностей. Нарушение связи происходит за счет гибридного (смешанного TE–TM) характера спектра собственных состояний метаповерхности [6, 7]. В работе обнаружено два механизма гибридизации — вследствие анизотропии и вследствие случайного вырождения собственных мод. Поляризационная структура и дисперсия поверхностных волн на анизотропной метаповерхности сильно зависят от частоты и направления их распространения. Это позволяет управлять направлением и абсолютным значением спина в плоскости метаповерхности [8].

Таким образом, анизотропные метаповерхности позволяют гибко управлять как продольной, так и поперечной компонентами спинового момента импульса поверхностных волн, что открывает новые возможности для многочисленных приложений топологической и спин-орбитальной фотоники, опто-механики, оптических коммуникаций, метрологии, квантовых алгоритмов обработки данных, спин-оптроники и др. [5,9].

Выражаю благодарность своему научному руководителю А.А. Богданову и научному сотруднику кафедры нанофотоники и метаматериалов Университета ИТМО И.В. Иоршу.

Литература

- [1] K.Y. Bliokh, A.Y. Bekshaev, F. Nori, *Nat. Commun.* **5** (2014).
- [2] T. Van Mechelen, Z. Jacob, *Optica* **3**(2), 118 (2016).
- [3] A. Kavokin, G. Malpuech, M. Glazov, *Phys. Rev. Lett.* **95**(13), 136601 (2005).
- [4] K.Y. Bliokh, D. Smirnova, F. Nori, *Science* **348**(6242), 1448 (2015).
- [5] K.Y. Bliokh, *et al.*, *Nat. Photonics* **9**(12), 796 (2015).
- [6] O.Y. Yermakov, A.I. Ovcharenko, M. Song, *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**(23), 235423 (2015).
- [7] J.S. Gomez-Diaz, M. Tymchenko, A. Alù, *Phys. Rev. Lett.* **114**(23), 233901 (2015).
- [8] O.Y. Yermakov, *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**(7), 075446 (2016).
- [9] F. Cardano, L. Marrucci, *Nat. Photonics* **9**(12), 776 (2015).

Оптически тонкий преобразователь поляризации электромагнитных волн терагерцового диапазона на основе метаматериалов

Д.В. Жирихин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Метаповерхности [1] — искусственно созданные двумерные периодические структуры, свойства которых обусловлены субволновой периодичностью (период структуры мал по сравнению с длиной волны) и задаваемой геометрией элементарной ячейки. Изменяя конфигурацию ячеек, можно реализовывать любые типы эффективных граничных условий, что позволяет контролировать характеристики электромагнитного поля и делает возможным создание на их основе принципиально новых устройств и компонентов: идеальных поглотителей [2], частотно-селективных поверхностей [3], поляризаторов [4] и др.

В данной работе была рассмотрена метаповерхность с зигзагообразным типом элементарной ячейки [4]. На ее основе был предложен принципиально новый подход для реализации поляризационных преобразователей электромагнитных волн терагерцового диапазона. Аналитически, была показана возможность широкополосного преобразования поляризации плоских электромагнитных волн из линейной в циркулярную при прохождении их через структуру. Также была разработана численная модель, подтверждающая результаты аналитической теории и позволяющая произвести выбор параметров структуры для производства экспериментального образца.

Литература

- [1] S.B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P.A. Belov, *et al.*, *Phys. Rep.* **634**, 1–72 (2016).
- [2] Y. Ra’di, C.R. Simovski, and S.A. Tretyakov, *Phys. Rev. Appl.* **3**, 037001, (2015).
- [3] K. Sarabandi, N. Behdad, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55**, 1239–1245 (2007).
- [4] J.D. Baena, J.P. del Risco, A.P. Slobozhanyuk, *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 245413 (2015).

Диэлектрические наноантенны для управления излучением источников одиночных фотонов на базе NV-центров в нанодиамазах

А.С. Залогина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Развитие квантовых систем передачи и обработки информации занимает исключительное положение в мире современных технологий [1]. Для про-

гресса таких систем необходимо активное развитие источников одиночных фотонов, так как фотоны являются идеальными носителями для увеличения скорости обработки и передачи информации. Наиболее подходящим элементом на роль источника одиночных фотонов является азот-вакансия (nitrogen-vacancy — NV) в наноалмазе [2]. Стоит также отметить, что помимо использования таких систем в качестве источников одиночных фотонов [1,2], интерес к ним существует также и в биофотонике и сенсорике [3,4]. Одной из основных проблем, ограничивающих применение наноалмазов с NV-центрами, является необходимость эффективного сбора излучения. Для решения этой проблемы нами исследовано взаимодействие наноалмаза, содержащего одиночный NV-центр, с наноантенной из диэлектрического материала (например, кристаллического кремния) методами численного моделирования. Выбор такой системы вызван тем, что в отличие от плазмонных, составляющие диэлектрических наноантенн — диэлектрические наночастицы — помимо электрического дипольного отклика могут обладать резонансным магнитным дипольным откликом, и они не имеют высоких потерь на оптических частотах. Учитывая малые размеры наноалмаза, NV-центр может рассматриваться как точечный дипольный излучатель. Вначале был проведен анализ влияния среды, окружающей такой диполь, т.е. наноалмаза. Анализ проводился на основе расчетов фактора Парселла, путем сравнения мощности излучения диполя в свободном пространстве и в наноалмазе (варьируемые параметры: диаметр, форма, расположение NV-центра относительно центра наноалмаза). Далее, для исследования влияния подложки был проведен ряд расчетов для диполя, находящегося в наноалмазе над подложкой. Было изучено изменение оптических свойств такой системы в зависимости от расстояния между нанобъектом и подложкой и ориентацией излучателя. Корректность модели была подтверждена аналитическими расчетам в соответствии с работой [5]. Наконец, был проведен анализ свойств излучения диполя, находящегося в наноалмазе, рядом с кремниевой наноантенной. Такая система исследовалась как в свободном пространстве, так и на подложке. Были рассчитаны значения фактора Парселла и диаграммы направленности для подобных систем, в зависимости от различных параметров (размер, форма наноантенны). По результатам теоретического анализа было показано, что комбинация диэлектрической наночастицы и наноалмаза, содержащего NV-центр, способна усиливать люминесценцию NV-центра и эффективно управлять характеристиками излучения. Полученные результаты могут быть использованы для дизайна систем нанобъектов, создаваемых для квантовых коммуникаций. В дальнейшем планируется экспериментальное исследование таких систем, используя подобранные нами оптимальные параметры для максимально эффективного сбора излучения и

управления световыми полями на наноуровне.

Литература

- [1] M.W. Doherty, N.B. Manson, P. Delaney, *et al.*, *Phys. Rep.* **528** 1–45 (2013).
- [2] I. Aharonovich, S. Castelletto, D.A. Simpson, *et al.*, *Rep. Progr. Phys.* **74** 076501 (2011).
- [3] R. Schirhagl, K. Chang, M. Loretz, *et al.*, *An. Rev. Phys. Chem.* **65**, 83–105 (2014).
- [4] P.C. Maurer, J.R. Maze, P.L. Stanwix, *et al.*, *Nat. Phys* **6**, 912–918 (2010).
- [5] A.E. Krasnok, A.P. Slobozhanyuk, C.R. Simovski, *et al.*, *Sc. Rep* **5** 1–16 (2013).

Резонансные неплазмонные наночастицы для эффективного оптического нагрева и нанотермометрии

Г.П. Зограф

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Плазмонные наночастицы характеризуются сильным взаимодействием со светом при помощи возбуждения локализованного поверхностного плазмонного резонанса. На резонансных оптических и ближних ИК-частотах это взаимодействие приводит к возбуждению свободных электронов с последующим преобразованием их энергии в фононы. Эти потери, связанные с фононным возбуждением, поддерживают джоулев нагрев наночастиц. В современных приложениях, таких как фотохимия [1], фотокатализ [2], фототермическая терапия [3] и биосенсинг [5], используются плазмонные наночастицы, в качестве наноразмерных источников тепла. Эффективный оптический нагрев достигается за счет использования малых наночастиц [6], наностержней [7], наноболочек [8] и т.д. [3], однако может легко произойти их плавление под воздействием умеренных лазерных интенсивностей [9], которое изменит форму наночастиц и резко снизит эффективность конверсии света в тепло. С другой стороны, неактивные фононы в комбинационном рассеянии плазмонных металлов не позволяют измерять температуру и, следовательно, точно управлять нагревом во время фототермических процессов.

Чтобы обойти данные проблемы и расширить применимость наноразмерных нагревателей, предлагается неплазмонная стратегия нагрева [11]. Здесь используется диэлектрические кристаллические наночастицы, например кремния, имеющие порог плавления выше 1500 К и активные фононные моды комбинационного рассеяния [12], которые пригодны для наноразмерной термометрии, благодаря тепловому сдвигу частоты комбинационного рассеяния [13]. В отличие от плазмоники, взаимодействие света и диэлектрических

наночастиц приводит к локализации электромагнитного поля внутри наночастицы с низкими потерями из-за малой мнимой части диэлектрической проницаемости. Этот эффект поддерживает различные нелинейные оптические эффекты, такие как генерация высших гармоник [14], управление светом [15] и другие [11].

В настоящей работе, нами экспериментально и теоретически продемонстрировано, что локализация поля также обеспечивает эффективное оптическое нагревание таких наночастиц несмотря на низкий уровень оптических потерь. Как оказалось, оптический нагрев резонансных кремниевых наночастиц может быть в ряде случаев более эффективными, чем нагрев плазмонных наночастиц. Более того, мы экспериментально показали возможность точной оптической термометрии.

За обсуждения при подготовке данной работы выражаю благодарность С.В. Макарову, М.И. Петрову и Ю.С. Кившарю.

Литература

- [1] S. Linic *et al.* *Nature materials* **14.6**, 567–576 (2015).
- [2] P. Christopher *et al.* *Nature chemistry* **3.6**, 467–472 (2011).
- [3] W. Lim *et al.* *Nano Today* **11.2**, 168–188 (2016).
- [4] P. Zijstra *et al.* *Nature nanotechnology* **7.6**, 379–382 (2012).
- [5] A. Govorov *et al.* *Nano today* **2.1**, 30–38 (2007).
- [6] M. Mackey *et al.* *The journal of Physical Chemistry B* **118.5**, 1319–1326 (2014).
- [7] M. Hu *et al.* *The journal of Physical Chemistry B* **110.4**, 1520–1524 (2006).
- [8] A. Taylot *et al.* *ACS Nano* **8.12**, 12071–12079 (2014).
- [9] A. Kuznetsov *et al.* *Science* **354.6314**, aag2472 (2016).
- [10] P. Dmitriev *et al.* *Nanoscale* **8.18**, 9721–9726 (2016).
- [11] J. Menendez *et al.* *Physical Review B* **29.4**, 2051 (1984).
- [12] M. Shcherbakov *et al.* *Nano letters* **14.11**, 6488–6492 (2014).
- [13] S. Makarov *et al.* *Nano letters* **15.9**, 6187–6192 (2015).
- [14] M. Caldarella *et al.* *Nature communications* **6** (2015).

Случайные матрицы и бозонный пик в двумерных моделях стекол

Д.А. Конюх

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Хорошо известно, что почти все стекла обладают универсальными свойствами в широкой области температур независимо от их химического состава. Одним из таких свойств является бозонный пик в приведенной плотности колебательных состояний [1]. Он характеризует избыточную по сравнению с

дебаевской плотность состояний. Бозонный пик наблюдается при измерениях теплоемкости $C(T)$ как максимум в $C(T)/T^3$, в комбинационном рассеянии света и рентгеновских лучей, в неупругом рассеянии нейтронов. Несмотря на огромное число работ, посвященных бозонному пику, его общепринятая физическая интерпретация по-прежнему отсутствует. В том числе, остается открытым вопрос о существовании бозонного пика в двумерных аморфных системах и его связи с упругими свойствами системы.

В аморфных телах, вследствие локального беспорядка, симметричная динамическая матрица M , соответствующая матрице силовых констант [2], до некоторой степени носит элемент случайности. Однако матрица M отражает определенные физические свойства, что накладывает на ее вид некоторые ограничения. Матрица M должна удовлетворять требованию механической устойчивости, то есть все ее собственные числа, соответствующие квадратам собственных частот [3], должны быть неотрицательными. Кроме этого, рассматриваемая система должна иметь необходимую жесткость для распространения в ней низкочастотных звуковых волн.

С учетом обозначенных выше свойств, динамическая матрица M может быть задана с помощью случайных матриц в виде [4]

$$M = AA^T + \mu M_0. \quad (1)$$

В двумерной системе матрица A является случайной квадратной матрицей, построенной на двумерной квадратной решетке с гауссовым распределением недиагональных матричных элементов между ближайшими соседями. Стандартная кристаллическая динамическая матрица M_0 построена на той же решетке, с единичными пружинками между соседними элементами. Параметр системы μ характеризует степень беспорядка системы и меняется в интервале $0 \leq \mu < \infty$.

В рассмотренной модели динамической матрицы M , как и в трехмерной задаче [4], при $\mu \ll 1$, имеется сильно неупорядоченная система с модулем Юнга $E \simeq \sqrt{\mu}$ и большими флуктуациями силовых констант по сравнению с их средним значением. Показано, что в такой системе плотность колебательных состояний $g(\omega)$ превосходит дебаевскую плотность состояний $g_D(\omega)$, образуя бозонный пик в приведенной плотности состояний $g(\omega)/g_D(\omega)$. Как показали численные расчеты, частота пика ω_b пропорциональна модулю Юнга E . Аналогичный результат был получен для трехмерных систем, однако в двумерных системах высота бозонного пика существенно слабее зависит от модуля Юнга E .

Автор благодарит к.ф.-м.н. Я.М. Бельтюкова и д.ф.-м.н., профессора Д.А. Паршина за помощь и консультации в подготовке работы.

Литература

- [1] V.L. Gurevich, D.A. Parshin, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **67**, 094203-1–094203-10, (2003).
- [2] А. Марадудин, Э. Монтролл, Дж. Вейсс. *Динамическая теория кристаллической решетки в гармоническом приближении* Мир, М. (1965) 383 с.
- [3] Я.М. Бельтюков, Д.А. Паршин, *ФТТ*, **53**, вып. 1, (2011).
- [4] Y.M. Beltukov, V.I. Kozub, D.A. Parshin, *Phys. Rev. B*, **87**, 134203-1–134203-20, (2013).

Взаимодействие электронов с магнитными возбуждениями в разбавленных магнитных полупроводниках

А.В. Коротченков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время активно исследуются ферромагнитные свойства разбавленных магнитных полупроводников, таких как $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ или $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$. Важной особенностью этих систем является наличие критической температуры, ниже которой магнитные моменты случайно расположенных атомов примеси оказываются ферромагнитно ориентированы. Возбуждениями данной системы являются спиновые волны, распространяющиеся в неупорядоченной матрице магнитных центров. В данной работе теоретически исследуется модификация электронного спектра и образование поляронов слабой связи за счёт обменного взаимодействия носителей с магнитной подсистемой. Особое внимание сосредоточено на изучении процессов рассеяния носителей с испусканием спиновых возбуждений.

Экспериментальные [1] и теоретические [2] исследования спиновых возбуждений в разбавленных магнитных полупроводниках указывают на то, что беспорядок в расположении магнитных центров приводит к существенному смягчению и уширению спектров спин-волновых возбуждений по сравнению с полностью упорядоченным ферромагнетиком. Аналогично тому, как модифицируются упругие механические колебания в неупорядоченных материалах [3], в разбавленной ферромагнитной системе можно выделить режим диффузионного распространения делокализованных спиновых колебаний. В работе развита теория, позволяющая количественно описать эффекты взаимодействия электронов со спиновыми возбуждениями в разбавленном магнитном полупроводнике. Мы рассчитали поправки к спектру носителей, их эффективные массы и времена жизни во втором порядке теории возмущений по обменному взаимодействию с магнитными атомами. Учет неупорядоченного расположения магнитных примесей осуществляется путем использования

функции Грина спиновых возбуждений, описывающей сложный спектр возбуждений в разбавленной магнитной матрице. Был обнаружен ряд качественных отличий свойств системы от случая регулярного ферромагнетика.

При нулевой температуре, когда все магнитные моменты ферромагнитно выстроены, обменное взаимодействие электронов с магнитными центрами приводит к спиновому расщеплению электронных состояний. В результате, испускание спиновой волны в процессе перехода электрона из состояния $-1/2$ в состояние с проекцией спина $+1/2$ характеризуется ненулевой пороговой энергией [4]. В упорядоченном ферромагнетике данный канал рассеяния оказывается замороженным при низких температурах, так как в системе отсутствуют термически возбужденные электроны с энергиями, превышающими пороговую [5]. В данной работе мы показываем, что при наличии беспорядка в расположении магнитных центров электрон с произвольной энергией может возбудить спиновые колебания. Полученные оценки времени жизни и эффективной массы носителей позволяют заключить, что спиновые возбуждения могут оказывать существенное влияние на транспортные свойства разбавленных магнитных полупроводников.

Автор выражает благодарность К.С. Денисову и Н.С. Аверкиеву за активное участие в решении сформулированной теоретической задачи и плодотворные обсуждения.

Литература

- [1] M. Sperl, A. Singh, U. Wurstbauer, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **77**, 125212 (2008).
- [2] A. Chakraborty, G. Bouzerar, *Phys. Rev. B*, **81**, 172406 (2010).
- [3] Y. M. Beltukov, V. I. Kozub, D. A. Parshin, *JETP Letters*, **96**, 641 (2013).
- [4] L. C. Davis, S. H. Liu, *Phys. Rev.*, **163**, 503 (1967).
- [5] R. B. Woolsey, R. M. White, *Phys. Rev. B*, **1**, 4474 (1970).

Воздействие наночастиц Ag на фотолюминесценцию квантовых точек InAs в GaAs

А.Н. Косарев

СПбПУ Петра Великого, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В структурах, где полупроводниковые квантовые точки (ПКТ) и металлические нановключения расположены близко друг к другу, возможна гибридизация экситонных и плазмонных возбуждений [1]. Это позволяет усилить взаимодействие света с веществом и увеличить эффективность оптоэлектронных приборов на ПКТ [2].

В данной работе исследовалась фотолюминесценция (ФЛ) пяти пространственно совмещенных слоев полупроводниковых ПКТ InAs, полученных методом Странского–Крастанова на поверхности GaAs. Выращивание производилось методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с ориентацией (001). Слои ПКТ InAs заращивались тонким слоем GaAs на который осаждалась пленка Ag. Последующий отжиг при температуре 200 °С ведет к распаду пленки на наночастицы, средний размер которых составляет 100 нм.

Были измерены спектры отражения от образца, покрытого частицами Ag, и его части, не покрытой серебром. Отражение в области прозрачности матрицы GaAs значительно возрастает. Для длины волны лазера возбуждения 660 нм и р-поляризации интенсивность отражения увеличивается в 1.6 раз. Несмотря на то, что более сильное отражение ведет к снижению интенсивности возбуждения, полная интенсивность ФЛ увеличилась в 1.5 раз. Усиление преимущественно происходит в области меньших энергий, практически исчезая при больших. Таким образом, с учетом увеличения интенсивности отражения, полная светимость увеличивается в 2.4 раз, что может объясняться взаимодействием в ближнем поле ПКТ и металлических нановключений.

Выражаю огромную благодарность А.А. Кондикову, В.В. Чалдышеву, Н.А. Торопову, П.В. Гладских, И.А. Гладских, Т.А. Вартаняну, В.В. Преображенскому, М.А. Путятю и Б.Р. Семягину за участие в исследовании.

Литература

- [1] W. Zhang, A. Govorov and G. Bryant, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 146804 (2006).
- [2] А. Лямкина, С. Мощенко, Д. Дмитриев и др., *Письма в ЖЭТФ*, **99**, 245 (2014).

Оптическое связывание частиц над металлической подложкой

Н.А. Костина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Оптические силы занимают важное место в создании фотонных кристаллов, упорядочивании частиц, манипулировании микро- и нанобъектами. Одним из видов контроля положения частиц является т.н. байндинг — явление оптического связывания [1]. Этот вид взаимодействия обусловлен перераспределением падающего на массив частиц излучения и, за счет этого, достигением ими устойчивых позиций. Таким образом становится возможным определить устойчивое положение для каждого объекта массива с высокой точностью, а также управлять движением нескольких частиц через воздействие на

одну из них. В данной работе рассматривается простейший случай поперечного связывания двух диэлектрических диполей, расположенных над металлической подложкой. В этом случае диполи взаимодействуют не только через рассеянный свет, но и посредством отраженного от подложки излучения [2]. Излучение диполей описывалось диадной функцией Грина. Таким образом, были получены аналитические выражения для сил, действующих на частицы при облучении структуры плоской волной. Кроме того, произведен расчет устойчивых (равновесных) положений для связываемых наночастиц. Численное моделирование показало значительное увеличение силы взаимодействия частиц (до 10 раз по сравнению с оптическим связыванием в свободном пространстве). Этот эффект достигается за счет возбуждения плазмона на поверхности металлической подложки. В таком случае, равновесные положения частиц определяются не параметрами падающего излучения, а характеристиками поверхностного плазмона, и, следовательно, частицы располагаются ближе друг к другу по сравнению с оптическим связыванием на диэлектрической подложке. Например, на резонансной частоте поверхностного плазмона ближайшие точки устойчивого равновесия частиц лежат на расстоянии, которое меньше, чем дифракционный предел. Для длин волн больших резонансной наблюдается существенное усиление силы связывания. Результаты с высокой точностью совпадают с численными расчетами в системе Comsol Multiphysics.

Литература

- [1] K. Dholakia, P. Zemánek, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1767–1791 (2010).
- [2] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of nano-optics*, Cambridge University Press: New York, (2012).

Исследование кристаллов HgSe:Fe методом электронного парамагнитного резонанса

И.В. Кочман

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Техника электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), широко применяемая как метод исследования твердого тела, позволяет получить богатую информацию о магнитных свойствах как невзаимодействующих, так и взаимодействующих ионов [1,2]. Исследуемый бесщелевой кристалл селенида ртути с примесями железа обладает целым набором уникальных свойств, делающих его интересным материалом для исследования. В кристаллах HgSe:Fe в валентной полосе энергий электронов возникают уровни, отвечающие ионам

Fe^{3+} и образованные 3d-оболочкой примесных атомов, замещающих атомы ртути. Вместе с этим одно из электронных состояний той же 3d-оболочки примесных атомов железа приводит к появлению в полосе проводимости кристалла донорного резонансного энергетического уровня [3].

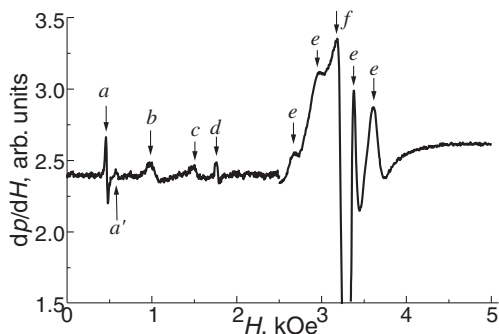


Рис. 1. Обработанный вид спектра ЭПР образца HgSe:Fe с концентрацией $N_{\text{Fe}} = 7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при направлении магнитного поля вдоль оси [001]. $T = 3 \text{ К}$. Стрелками указаны идентифицированные резонансы.

Проявление взаимодействия электронов проводимости с примесными ионами становятся заметными, когда с увеличением концентрации примесей энергия Ферми достигает энергии донорного уровня. Последующее увеличение концентрации примесей не приводит к росту концентрации электронов проводимости, а электронные состояния в результате содержат как компоненту свободного движения, так и локализованную, демонстрируя тем самым эффект гибридизации [4].

В связи с этим в данной работе поставлена задача наблюдения и изучения полного спектра ЭПР в системе HgSe:Fe . Спектр ЭПР образца с концентрацией железа $N_{\text{Fe}} = 7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при температуре $T = 3 \text{ К}$ в магнитном поле $\mathbf{H} \parallel [001]$ показан на рисунке 1. Стоит отметить, что получаемые резонансы наблюдаются на фоне плавной кривой магнитосопротивления кристалла, которая с целью повышения наглядности графика была исключена. Символами a и a' показаны положения резонансов на электронах проводимости; b и c — можно связать с проявлениями двух- и трех-квантовых переходов в тех же резонансах; d — относится к проявлению резонанса на локализованной компоненте гибридизированных состояний, резонансы e — отражают ЭПР на Fe^{3+} , которые наблюдались в [5]. Резонанс f отражает наличие случайных примесей в кварцевой трубке криостата и в держателе образца.

По результатам измерений проведена оценка значений g -фактора электронов проводимости и электронов в валентной полосе энергий. Определено значение эффективной массы электронов в полупроводнике, а также определена температурная зависимость магнитной восприимчивости ионов Fe^{3+} .

Литература

- [1] Дж. Людвиг, Г. Вудбери. *Электронный спиновый резонанс в полупроводниках*, М. (1964).
- [2] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек и др., *ФТП*, **32**, 557 (1998).
- [3] И.М. Цидильковский, *УФН* **162**, **63** (1992).
- [4] В.И. Окулов и др., *ФНТ*, **31**, 1143 (2005); **33**, 282 (2007);
- [5] A. Lenard, T. Dietl, M. Sawicki *et al.*, *J. Low Temp. Phys.* **80**, 15 (1990).

Электромагнитные свойства низкодобротных оптических резонаторов

К.Л. Кошелев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Любой реальный оптический резонатор является открытым резонатором и представляет собой неэрмитовую систему. В квантовой механике неэрмитовые системы обычно изучают с помощью аппарата теории возмущений, вычисляя вероятности переходов из дискретного энергетического спектра в непрерывный. В задачах оптики хорошее аналитическое описание в рамках теории возмущений можно получить только для высокодобротных мод, например, мод шепчущей галереи, а точное решение существует только для высокосимметричных оптических резонаторов.

Широкий класс систем, в которых потери энергии значительны, не может быть описан в рамках этих методов. Так, электромагнитный отклик диэлектрических наночастиц, являющихся основным строительным блоком диэлектрической нанофотоники, в оптическом диапазоне в первую очередь определяется структурой их низкодобротных резонансов. Задача нахождения спектра таких систем становится нетривиальной из-за их субволнового размера. Стандартные численные методы требуют больших вычислительных ресурсов, но зачастую дают неудовлетворительный результат, так как при решении задачи на собственные числа существенные помехи вносят моды нормировочного объема, а при моделировании задачи рассеяния полученные данные могут не содержать информации о значительной части спектра собственных мод. В частности, в спектре рассеяния не будут видны темные моды резонатора, не взаимодействующие с модами дальнего поля, например, в силу симметрии [1].

В работе на примере конечного диэлектрического цилиндра проанализирована структура мод низкодобротных диэлектрических резонаторов. Был использован полу-аналитический способ нахождения спектра неэрмитовых систем, основанный на методе разложения по резонансным состояниям (PPC).

Метод PPC, используемый в задачах квантовой механики [2], недавно был развит для анализа векторных полей в электродинамике [3].

В работе с помощью метода PPC найден полный спектр резонансных мод конечного диэлектрического цилиндра, даже тех, которые не обнаруживаются в спектре рассеяния при падении плоской электромагнитной волны. Также вычислено распределение электромагнитного поля собственных мод и построена функция Грина. Полученные результаты подтверждены результатами численного моделирования. Показано, что реализованный полуаналитический метод работает на несколько порядков быстрее, чем численные методы FEM и FDTD.

В работе изучена зависимость спектра резонансных мод от геометрических размеров цилиндра и его диэлектрической проницаемости. Показано, что при изменении размера электрическая дипольная мода цилиндра переходит в магнитную дипольную моду, и наоборот. Показано, что область перехода графически описывается антикроссингом кривых зависимости собственных частот от размера. Предложено аналитическое описание области антикроссинга с помощью модели двухуровневой системы с взаимодействием. Показано, что в окрестности перехода двухуровневое приближение совпадает с точным численным расчетом методом PPC. Полученные результаты позволяют аналитически подобрать параметры цилиндра, работающего как оптический элемент Гюйгенса за счет вырождения спектра магнитной и электрической дипольной моды.

Литература

- [1] K.S. Friziuk, *et al.*, *Proc. of Days on Diffraction*, 155–160 (2016).
- [2] L.A. Weinstein, *Open resonators and open waveguides*, (Golem Press, Boulder, Col.) (1969).
- [3] M.B. Doost, W. Langbein, and E.A. Muljarov, *Phys. Rev. A* **90**, 013834 (2014).

Генерация и релаксация напряжений при плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии гетероструктур на основе (Al,Ga)N соединений

О.А. Кошелев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Эффективность полупроводниковых приборов ультрафиолетового диапазона длин волн (210–360 нм) определяется развитием эпитаксиальных тех-

нологий широкозонных соединений (Al,Ga)N, в том числе и плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ), обладающей целым набором уникальных возможностей по низкотемпературному росту ($T < 800$ °C) и прецизионному формированию наноструктур. Отсутствие коммерчески доступных гомоэпитаксиальных подложек обуславливает использование гетероподложек, что неизбежно приводит к генерации в гетероструктурах (ГС) сжимающих и (или) растягивающих напряжений, приводящих к появлению различных дефектов, растрескиванию или отслоению слоев. Поэтому для роста качественных ГС необходимо непрерывно контролировать напряжения в них. В работе сообщаются результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов генерации и релаксации упругих напряжений при росте ГС GaN/AlN/6H-SiC методом ПА МПЭ с целью достижения минимальных значений кривизны подложки и плотностей прорастающих дислокаций.

ГС GaN(2.8 мкм)/AlN(520 нм) выращивались на подложке 6H-SiC на установке ПА МПЭ Compact21T, оснащенной самостоятельно разработанным многолучевым оптическим измерителем напряжений (МОИН), позволяющим контролировать *in situ* инкрементальные значения кривизны подложки. На основе экспериментальных данных моделировалось поведение напряжений в ГС при варьируемых параметрах слоев и условиях их роста с учетом как кристаллографического рассогласования постоянных решеток слоев и подложки, так и различий коэффициентов их теплового расширения (КТР).

В ходе экспериментов был обнаружен упруго-сжатый характер роста слоев AlN на подложках 6H-SiC с постоянными величинами инкрементальных напряжений -3 и -2.2 ГПа в зависимости от режима роста. При последующем росте слоев GaN наблюдалась постепенная релаксация первоначально высоких сжимающих инкрементальных напряжений, обусловленных кристаллографическим рассогласованием, которые снижались от начального значения -6.3 ГПа до полной релаксации на толщине ~ 1.8 мкм. При дальнейшем росте GaN буферного слоя наблюдались постоянные инкрементальные растягивающие напряжения $+0.4$ ГПа, проявляющиеся вплоть до конца роста. После остывания ГС, несмотря на генерацию в ней инкрементальных растягивающих напряжений $+0.39$ ГПа из-за различий КТР подложки 6H-SiC и GaN, структура, благодаря достаточно высоким сжимающим напряжениям в слоях AlN и GaN, сохраняла сжимающий характер средних остаточных напряжений. Это позволило полностью предотвратить растрескивание ГС.

Исходя из полученных экспериментальных данных, были спрогнозированы изменения напряжений во время роста ГС с различными условиями роста и дизайном. В частности, было определено, что для изготовления транзисторной ГС при выбранных условиях ПА МПЭ для обеспечения ее планарности

(нулевой кривизны) необходимо обеспечить рост буферного слоя GaN с толщиной 5 микрон.

Влияние коллоидного золота на люминесценцию Eu^{3+} в боросиликатных стеклах

В.А. Кравец

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Редкоземельные ионы Eu^{3+} широко используются в современной науке и технике — материалы, содержащие Eu^{3+} , применяют в качестве красного люминофора. Одним из способов увеличения интенсивности люминесценции является формирование в излучающих материалах наноразмерных металлических частиц. В этом случае образующиеся поверхностные плазмоны могут увеличивать заселенность излучательных уровней, что приводит к увеличению интенсивности люминесценции.

Целью данной работы было исследование влияния коллоидного золота на интенсивность излучения иона европия в боросиликатном стекле.

Для этих целей было синтезировано боросиликатное стекло активированное трехвалентным ионом европия с содержанием 3,8% вес. После этого, в этом образце было растворено золото с содержанием менее 0,2% вес. Образование наноразмерных частиц золота в стекле подтверждается интенсивной окраской стекла в красный цвет, что характерно для коллоидных растворов золота.

Также стоит отметить что, спектр люминесценции Eu^{3+} представляет собой набор узких полос, которые связаны с переходами между уровнями 5D_J и $(^7F)_J$ иона. В зависимости от локального окружения Eu^{3+} , меняется форма его спектра, что позволяет изучать структурные изменения активированного ионами Eu^{3+} стекла.

Спектры люминесценции возбуждались электронным пучком с энергией 15 кэВ. Предварительные эксперименты показали, что интенсивность катодолюминесценции в стеклах с коллоидным раствором золота несколько выше, чем в стеклах без золота. В дальнейшем будут рассмотрены параметры подобных коллоидных растворов, влияющие на спектры Eu^{3+} .

Влияние электронного облучения и электрического поля на спектры оптического поглощения нанопористых стекол с наночастицами серебра

Д.И. Маркина

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время особый интерес как для теоретических исследований, так и для прикладного применения представляют собой плазмоны в металлических наночастицах, в силу того, что при возникновении плазмонного резонанса происходит локальное усиление амплитуды поля электромагнитной волны внутри и вблизи нанообъекта, а в ансамбле взаимодействующих наночастиц могут возникать «горячие» точки, в которых усиление поля может достигать сотен раз. Данный эффект имеет большое значение, так как локальное усиление поля может приводить к усилению люминесценции и рамановского рассеяния, и следовательно — к увеличению чувствительности химических и биологических датчиков и сенсоров [1,2].

Судить об изменениях структуры и оптических свойств нанокompозитов можно по спектральным характеристикам материалов: полосы поглощения, связанные с плазмонными резонансами, зависят от материала наночастиц, их размера и формы, а также от показателя преломления окружающей среды, электромагнитного взаимодействия между частицами и других факторов.

Целью работы являлось исследование воздействия электрического поля, создаваемого электродами разной природы, на нанопористые силикатные стёкла с синтезированными в их объёме наночастицами серебра и анализ оптических спектров полученных нанокompозитов.

Результатом эксперимента стало появление и рост дендритных структур, состоящих из наночастиц серебра, в области отрицательного электрода (рис. 1а) Именно для таких структур характерно появление «горячих точек», в которых амплитуда поля электромагнитной волны локально возрастает в сотни раз [3,4].

Оптические спектры поглощения, снятые в области отрицательного электрода (рис. 1б), демонстрируют появление двух дополнительных плазмонных полос поглощения. Это может быть объяснено тем, что сферические наночастицы приняли форму эллипсоида после воздействия, причем, чем более вытянут эллипсоид, тем более удаляются эти спектральные полосы друг от друга. Данное предположение было подтверждено результатами моделирования спектральных зависимостей для наночастиц разной формы.

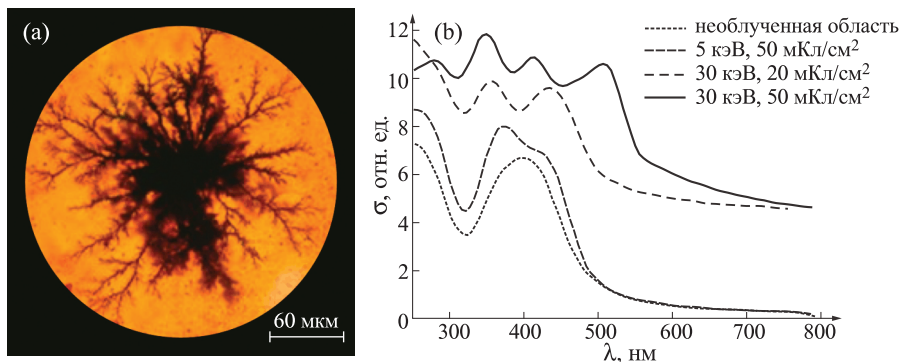


Рис. 1. (а) дендритная структура в области отрицательного электрода-иглы, (б) спектральные характеристики наночастиц в случае, когда роль отрицательного электрода выполняет электронный пучок. Облучение производилось при разных дозах и энергиях электронов. Кривые для облучения с энергией электронов 30 кэВ, дозой 20 и 50 мКл/см² сдвинуты вдоль оси ординат на 4 относительные единицы.

Мы полагаем, что причиной наблюдаемых эффектов является миграция ионов серебра, эмитированных с наночастиц в электрическом поле. В результате происходит перераспределение наночастиц и образование нейтральных атомов, увеличивается концентрация и размер наночастиц вблизи отрицательного электрода, что приводит к изменениям локальных полей вблизи этого электрода. В тех местах, где напряженность поля достаточно велика, концентрация наночастиц увеличивается и начинается рост серебряных микродендритов.

Литература

- [1] В.В. Климов *Наноплазмоника* — Москва: Физматлит, 2009. 480 с.
- [2] A.V. Nashchekin, V.N. Nevedomskiy, P.A. Obratsov, *et al.* *Proc. of SPIE*. 2012. V. 8427. P. 842739.
- [3] S.J. Lee, A.R. Morrill, M. Moskovits, *J. Am. Chem. Soc.* 2006. No. 128. P. 2200–2201.
- [4] S.V. Karpov, V.S. Gerasimov, I.L. Isaev, *et al.* *J. Chem. Phys.* 2006. 125, 111101.

Исследование радиационной стойкости кремниевых детекторов излучения тяжелых ионов

Д.Д. Митина

Академический университет, Санкт-Петербург, Россия

Деградация электрофизических свойств объема детектора при облучении неизбежна, поэтому величина электрического сигнала, генерируемого излучением, всегда будет уменьшаться. Для любого детектора разработка сценария деградации его характеристик является важнейшей задачей. Влияние облучения легкими частицами, такими как протоны, электроны было тщательно изучено [1], [2], однако исследования, касающиеся тяжелых ионов, является принципиально новой и важной задачей.

Объектом исследования в данной работе являются высокоомные эпитаксиальные пленки чистого кремния, выращенного на толстой низкоомной кремниевой подложке. Образцы были облучены тяжелыми ионами аргона с энергией порядка 50 МэВ. При таких энергиях тяжелый ион является короткопробежным и формирует пик Брэгга, в котором локализуется большая часть радиационных дефектов. В работе рассматривается возможность исследования кремниевых облученных p-i-n структур, в которых концентрация глубоких уровней соизмерима с концентрацией мелких доноров. Для исследования таких структур применялась методика нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) [3]. В стандартном НЕСГУ требуется сохранение проводимости, что и позволяет получить зависимость ширины области пространственного заряда от температуры. При компенсации такая возможность исчезает из-за превращения базы в изолятор. Это является принципиальным ограничением на данный метод. Были получены НЕСГУ-спектры для образцов, облученных тяжелыми ионами аргона, которые формируют пик Брэгга. Показано, что при этом становится возможным получить спектры, в независимости от степени компенсации материала в облученном слое. Разработана модель обработки результатов, а также рассмотрены связанные особенности по использованию данного режима измерения.

Таким образом, была исследован сценарий деградации кремниевых детекторов, а также выявлены особенности методики НЕСГУ в применении к изучению глубоких уровней, сформированных тяжелыми ионами. Установлена возможность применения НЕСГУ для исследования перекомпенсированных слоев в p-i-n структурах.

В дальнейшем планируется продолжение исследований, увеличение дозы облучения с целью рассмотрения случая полной компенсации материала де-

тектора, а также применение методики нестационарной токовой спектроскопии.

Литература

- [1] U. Biggeri, E. Borchì, M. Bruzzi, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **409**: 176–179, 1998
- [2] V. Eremin, A. Ivanov, E. Verbitskaya, *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **426**: 120–125, 1999
- [3] D.V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**(7): 3023–3032, 1974

Эффект Парселла в оптических решетках Фибоначчи

К.М. Морозов

Академический университет, Санкт-Петербург, Россия

Фотонные квазикристаллы обладают рядом интересных свойств, таких как локализация света, связанная с фрактальной плотностью состояний [1,2]. Примером одномерного фотонного квазикристалла может послужить оптическая решетка Фибоначчи. Известно, что скорость спонтанной эмиссии может изменяться в случае, если излучатель помещен в среду с пространственно-неоднородной диэлектрической проницаемостью [3]. Строгий расчет темпа спонтанной эмиссии в слоистых средах может быть осуществлен с помощью метода S-квантования [4,5]. Работа посвящена исследованию изменения вероятности спонтанной эмиссии для диполя, помещенного в оптическую решетку Фибоначчи. Показано, что для излучателя, помещенного в решетку Фибоначчи, может иметь место как усиление спонтанной эмиссии (если частота и направление излучения диполя соответствуют собственной оптической моде структуры, а положение соответствует максимуму в профиле электрического поля собственной моды), так и подавление спонтанной эмиссии (в случае запрещенной зоны). Показано, что как подавление, так и усиление спонтанной эмиссии в квазикристаллах сравнимо с таким эффектом в периодических брэгговских отражателях, но менее выражено, чем в микрорезонаторах на их основе [6].

Литература

- [1] M.A. Kaliteevski, R.A. Abram, *et al.*, *Opt. Spect.* **91** 109–118 (2001).
- [2] W. Gellermann, M. Kohmoto, B. Sutherland, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **72** 633 (1994).
- [3] E.M. Purcell, *Phys. Rev.* **69**, 681 (1946).
- [4] M.A. Kaliteevski, V.A. Mazlin, K.A. Ivanov, *et al.*, *Opt. Spect.* **119**, 832–837 (2015).
- [5] M.A. Kaliteevski, A.R. Gubaidullin, K.A. Ivanov, *et al.*, *Opt. Spect.* **121**, 71–81 (2016).
- [6] K.M. Morozov, K.A. Ivanov, A.R. Gubaidullin, *et al.*, *Opt. Spect.* (2017) in press.

Технологии получения и термоэлектрические свойства полупроводниковых высших силицидов переходных металлов

Н.С. Петрова

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Соединения кремния с переходными металлами обладают большим разнообразием физических свойств и находят широкое применение в технике. Среди них известны классические сверхпроводники с рекордными значениями T_c , материалы для электронной и ИК-техники, эффективные и дешевые термоэлектрики [1-4].

Среди большого класса силицидов переходных металлов полупроводниковыми свойствами обладают четыре соединения: CrSi_2 , $\text{MnSi}_{1,75}$, FeSi_2 , $\text{ReSi}_{1,75}$. Все они характеризуются сильной анизотропией кинетических свойств [2,3] и являются перспективными термоэлектриками [2].

В настоящей работе:

1. Рассмотрены особенности фазовых диаграмм в области существования этих соединений, проанализированы возможности получения гомогенных поликристаллов и объемных монокристаллов методами Бриджмена, Чохральского, кристаллизацией из раствора-расплава и газотранспортной реакции;
2. Проанализированы результаты исследования кристаллической структуры, микроструктуры и причины периодической гетерогенизации объемных образцов этих соединений;

На основе результатов исследования температурных зависимостей термоэлектрических свойств (удельной электропроводности, термоЭДС, теплопроводности) показано, что этот класс соединений является перспективным для создания как классических, так и анизотропных термоэлектрических преобразователей нового поколения [5].

Литература

- [1] L.I. Anatyshuk, *Thermoelements and thermoelectric devices*, 1979, Kiev, Naukova dumka, 768 p.
- [2] M.I. Fedorov, V.K. Zaitsev, *Thermoelectric handbook: macro to nano*, ed. by Rowe D.M., 2006, London–New York, CRC press, pp. 31-1–31-19
- [3] H. Lange, *Phys. stat. sol. (b)* 1997, v. 201, N1, pp. 3–65.

- [4] V.K. Zaitsev, *Handbook of thermoelectric*, ed. by Rowe D.M., 1995, N.Y., CRC press, pp. 299–309.
- [5] Д.А. Пшенай-Северин, В.К. Зайцев, Ю.В. Иванов и др. Доклады Межгосударственной конференции 2014 г., С.-Петербург, 2015, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 192–198.

Моделирование методов молекулярной динамики модификации поверхности кристалла GaAs при наноиндентировании зондом атомно-силового микроскопа

Н.Д. Прасолов

Университет ИТМО, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Трибологические явления возникают при механическом взаимодействии поверхностей в процессе трения при их относительном движении. Существенную роль в этом процессе играют отдельные множественные микроконтакты, возникающие при соприкосновении трущихся поверхностей, общая площадь которых значительно меньше, чем это следует из геометрических размеров соприкасающихся деталей. Трибологические исследования вышли на новый уровень с изобретением методов атомно-силовой микроскопии (АСМ), когда появилась возможность с высоким пространственным разрешением исследовать физические свойства единичного микроконтакта, сформированного в точке соприкосновения зонда АСМ с исследуемой поверхностью [1].

В качестве тестового объекта выбрана поверхность эпитаксиальных слоев GaAs, выращенных методами молекулярно-пучковая и МОС-гидридной эпитаксии. Данные объекты характеризуются высоким кристаллическим совершенством поверхности и объема.

Ранее были проведены исследования процесса трибоэлектризации совершенных кристаллических слоев GaAs в результате сканирования по поверхности зонда атомно-силового микроскопа в контактном режиме. Была установлена связь изменения локального потенциала с концентрацией точечных дефектов, которые генерируются в приповерхностных слоях образцов под влиянием деформации этих слоев при сканировании зонда [2,3]. Предполагается, что при взаимодействии зонда АСМ с поверхностью кристалла в приповерхностных слоях твердого тела возникают дефекты, обусловленные перемещением в эти слои атомов зонда и образованием собственных межузельных атомов или других, более сложных дефектов. Эти дефекты создают дополнительные электронные состояния, которые можно рассматривать как поверхностные

состояния. Если эти состояния расположены ниже исходного положения поверхностного уровня Ферми в n-GaAs, на них локализируются электроны, что и приводит к появлению дополнительного отрицательного заряда на поверхности и уменьшению ее потенциала [3].

В данной работе представлены результаты исследования взаимодействия зонда АСМ с поверхностью GaAs, имеющего совершенную кристаллическую структуру. Методами молекулярной динамики (МД) был проведен ряд экспериментов, включающих в себя индентирование на небольшие глубины (до 1 нм), без учета капиллярных сил и сил адгезии, в ходе которых была получена информация о трехмерном распределении значений тензора локальной деформаций. Было проведено моделирование процессов генерации точечных дефектов в приповерхностных слоях GaAs в зависимости от скорости движения индентора и температуры образца. Показано, что полученные результаты могут быть описаны с использованием кинетической модели разрушения С.Н. Журкова [4], где генерация точечных дефектов в деформированных областях происходит за счет флуктуаций термической энергии. Данная модель позволяет описать полученные зависимости локального изменения потенциала от скорости сканирования и силы прижима зонда АСМ.

Литература

- [1] B. Bhushan, A.V. Goldadem, *Wear*, **244** 104 (2000).
- [2] П.Н. Брунков, В.В. Гончаров, М.Э. Рудинский и др., *ФТП*, **47/9** 1181 (2013).
- [3] А.В. Бакланов, А.А. Гуткин, Н.А. Калюжный и др., *ФТП*, **49/8** 1083 (2015).
- [4] S.N. Zhurkov, *Int. J. Fract.*, **26** 295 (1984).

Высокодобротные микрорезонаторы на основе локализованных оптических состояний непрерывного спектра

З.Ф. Садриева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Исследование фотонных кристаллов активно проводится по всему миру. До недавнего времени считалось, что в области непрерывного спектра (внутри светового конуса) могут существовать только утекающие или свободно распространяющиеся моды. Утекающие моды имеют значительные радиационные потери, поэтому их применение в приложениях затруднительно. Однако, в 2008 году появились теоретические работы [1,2], доказывающие существование мод периодических фотонных структур с частотами, лежащими

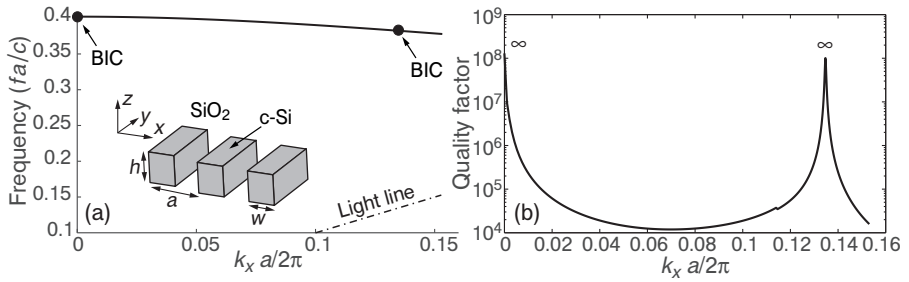


Рис. 1. Дисперсия (а) и добротность (б) локализованного оптического состояния непрерывного спектра (BIC) в периодической фотонной структуре (см. вставку).

внутри светового конуса, но не имеющих радиационных потерь — локализованных оптических состояний непрерывного спектра. Вследствие полного отсутствия потерь, добротность этих состояний неограниченно высока.

На основе локализованных оптических состояний непрерывного спектра можно создать новых класс высокодобротных микрорезонаторов, не имеющих фундаментальных ограничений добротности и полностью совместимых с планарными технологиями.

Несмотря на предсказания теории, добротность реального резонатора всегда конечна, хотя и высока, в силу несовершенств фотонной структуры, таких как материальные потери, шероховатости поверхности, неоднородности, конечный размер и наличие подложки.

В работе теоретически и экспериментально исследовано влияние подложки и шероховатости поверхности на положение и добротность резонанса в одномерной периодической фотонной структуре, изготовленной из silicon-on-insulator подложки. Показано, что два механизма потерь энергии: рассеяние на шероховатостях и утечка в подложку, конкурируют между собой, и существует оптимальная толщина буферного слоя между структурой и подложкой, превышение которой не влияет на характеристики резонатора.

Автор благодарит И.С. Синева, А.А. Богданова, А.К. Самусева, А.В. Лавренко.

Литература

- [1] D.C. Marinica, *et al.*, *J. Phys. Rev. Lett.* **100**, 183902 (2008).
- [2] E.N. Bulgakov, A.F. Sadreev, *J. Phys. Rev. B* **78**, 075105 (2008).

Усиление фотолюминесценции от гибридных перовскитов за счет лазерного нанесения кремниевых наночастиц

Е.Ю. Тигунцева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Интерес к перовскитам вырос, когда при исследовании эффективности преобразования фотоэлектрической энергии, эффективность выросла с 6,5 до 9,7% и почти сразу до 19% в 2012–2015 гг. [1]. Эти впечатляющие показатели эффективности позволили перовскитам составить конкуренцию ведущим солнечным материалам третьего поколения. В настоящее время эффективность преобразования увеличилась до 22,1% [2], благодаря успешным исследованиям по формированию перовскитной плёнки. Были исследованы новые применения этого гибридного материала, например для таких устройств, как светоизлучающие диоды, полупроводниковые оптические усилители и лазеры [3].

Нами была изучена возможность повышения эффективности устройств на основе гибридного перовскита (MAPbI_3). Проведены эксперименты по нанесению резонансных наночастиц кремния (Si). На поверхность гибридного перовскита они были нанесены методом лазерной печати [4]. Также проводились эксперименты по изучению фотолюминесценции полученной структуры. Результат исследования подтвердил усиление фотолюминесценции на участке перовскита с наночастицами, значение усиления превышает показатели на участке образца без наночастиц в 1,5 раза.

Исследование полученной структуры осуществлялось с помощью методов сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Получены результаты по изменению поглощательной способности материала при добавлении наночастиц, а также получены и проанализированы результаты времени затухания люминесценции.

Проведенные исследования показали, что наночастицы кремния, нанесённые на поверхность гибридного перовскита предложенным методом, повысили эффективность фотолюминесценции материала. Таким образом, нанесение наночастиц на перовскит является перспективным направлением развития оптоэлектроники.

В дальнейшем планируется попробовать создать прототип солнечного элемента на основе гибридного перовскита с кремниевыми наночастицами.

За обсуждения при подготовке данной работы благодарю С.В. Макарова,

А.А. Захидова, Ю.С. Кившаря.

Литература

- [1] H. Kim, C. Lee, J. Im, *et al.*, *Scientific Reports* **2**, 591 (2012).
- [2] M. Saliba, T. Matsui, J. Seo, *et al.*, *Energy & Environ. Sci.* **9**, 6 (2016).
- [3] B.R. Sutherland, E.H. Sargent *Nature Photonics* **10**, 295 (2016).
- [4] P.A. Dmitriev, S.V. Makarov, V.A. Milichko, *et al.*, *Nanoscale* **8**, 5043 (2016).

Методы получения квантово-запутанных состояния Бозе-конденсатов экситон-поляритонов для прецизионных измерений

Д.В. Царёв

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Конденсат Бозе–Эйнштейна (БЭК) — состояние вещества, при котором возможно наблюдение квантовых свойств на макроуровне, например, явления сверхпроводимости и сверхтекучести. БЭК экситон-поляритонов используются для создания новых источников когерентного излучения, т.н. «поляритонный лазер» [1–3]. Поляритонный лазер отличается от традиционного лазера компактностью и низким порогом накачки, что позволяет создавать небольшие маломощные устройства. Однако, на этом отличия не заканчиваются. При определенных условиях конденсата экситон-поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе, можно добиться квантово-запутанного излучения, т.н. состояние котов Шредингера и NOON-состояние. Такое излучение можно эффективно использовать для прецизионных измерений.

Целью работы является разработка модели, позволяющей описать квантово-запутанные состояния излучения поляритонного лазера. На данный момент такая модель не имеет известных нам опубликованных или анонсированных аналогов. В основе модели лежит метод, использованный в работе [4] для описания взаимодействующих атомарных БЭК в двух электромагнитных ловушках. Система уравнений Гросса–Питаевского, широко применяемая для описания Бозе-конденсатов, вначале интегрируется при условии отсутствия взаимодействия между ловушками, затем с помощью формализма Лагранжа находятся решения для взаимодействующих ловушек. Далее нами найдены стационарные состояния для данных решений и проверена их стабильность. Состояние котов Шредингера оказалось стабильным, NOON-состояние, как и ожидалось, динамически нестабильно. Для состояния Шредингеровских котов найдены средние значения операторов Стокса и их дисперсии для излучения, выходящего из микрорезонатора; найдены условия реализации спинового

сжатия флуктуаций, а также проверено выполнение критерия квантовой запутанности [5]. Операторы Стокса являются эрмитовыми, таким образом их средние величины и дисперсии можно проверить экспериментально.

В ближайшее время планируется оценить квантовую запутанность состояния, а также количественно выяснить границы применимости данного состояния для прецизионных измерений. Кроме того, в будущем планируется адаптировать модель для получения стабильного NOON-состояния в поляритонном интерферометре, которое является очень полезным для прецизионных измерений квантовых вычислений.

Литература

- [1] A. Imamoglu and R.J. Ram. *Phys. Rev. A* 53, 4250–4253 (1996).
- [2] M. Zamfirescu *et al.*, *Phys. Rev. B* 65, 161205 (2002).
- [3] D. Bajoni *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 100, 047401 (2008).
- [4] S. Raghavant and G.P. Agrawal, *J. of Modern Optics* 47, 1155–1169 (2000).
- [5] M. Hillery and M.S. Zubairy, *Phys. Rev. Lett.* 96, 050503 (2006).

Международная зимняя школа по физике полупроводников 2017

Научные сообщения молодых ученых

ISBN 978-5-93634-???-?

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
188350, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. ??, тир. 150, уч.-изд. л. 3.5, 13.02.2017 г.