

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

Международная зимняя школа по физике полупроводников

2020

Научные сообщения молодых ученых

С.-Петербург – Зеленогорск
27 февраля – 2 марта 2020 года

Организатор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
Соорганизатор «Гелиос-отель»

Программный комитет

П.С. Копьев (*председатель*)

Е.Л. Ивченко

Р.А. Сурис

В.И. Козуб

О.М. Сресели

А.Ю. Маслов

С.А. Тарасенко

Е.В. Куницына

П.А. Дементьев

П.А. Алексеев

Организационный комитет

А.Г. Забродский (*председатель*)

Р.В. Парфеньев (*зам. председателя*)

Л.Ф. Гребеновская

Е.В. Куницына

П.А. Дементьев

Е.В. Иванова

Финансовая поддержка

Российский фонд фундаментальных исследований
проект № 20-02-20024

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

Техническая поддержка

ООО «АНДЕРС»

Воскресенье, 1 марта	7
<i>П.И. Геревенков</i>	
Оптически-возбуждаемые спиновые волны в системе двух динамически-связанных ферромагнитных слоев	7
<i>И.В. Горбенко</i>	
Оптический отклик плазменного кристалла: индуцированный током переход от поглощения к усилению.	9
<i>М.С. Иванов</i>	
Циркуляционные токи в высоковольтных пикосекундных лавинных переключателях	11
<i>С.А. Кадинская</i>	
Исследование лазерной генерации перенесенных на подложку кремния микролазеров с активной средой на основе квантовых точек InAs/InGaAs	12
<i>Н.В. Леппенен</i>	
Кулоновские эффекты в поглощении и фототоке в системах с дираковским спектром	13
<i>В.Ю. Мьельников</i>	
Коническая рефракция излучения гауссовского источника модели Шелла	15
<i>Д.А. Парафинюк.</i>	
Оптические свойства содержащих ионы европия многослойных структур, сформированных золь-гель методом	16
<i>С.О. Поташин</i>	
Оптическое возбуждение циркулярных токов и обратный плазмонный эффект Фарадея в двумерной электронной жидкости	17
<i>И. О. Райков</i>	
Фононы в кристаллическом и аморфном графене	18

<i>Н.В. Сиверин</i>	Спонтанный магнитодиэлектрический эффект в антиферромагнитном фториде кобальта CoF_2	20
<i>Я.А. Филатов</i>	Влияние градиента температуры на параметры лазерно-индуцированных магнитостатических волн	21
<i>Д. Хмелевская</i>	Управление фотолуминесценцией квантовых точек CdSe/ZnS в гибридных структурах с плазмонными наночастицами	23
Стендовая сессия		25
<i>А.С. Антонов</i>	Термоэлектрические свойства CoSi и твердых растворов $\text{Co}_{1-x}\text{M}_x\text{Si}$ ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Ni}$)	25
<i>М.С. Берминова</i>	Особенности структуры нитевидных нанокристаллов CuO по данным электронной микроскопии	26
<i>П.С. Гаврина</i>	Тиристорный токовый ключ для управления накачкой мощных полупроводниковых лазеров	29
<i>Д.А. Горбенко</i>	Исследование синтеза протопорфирина IX, индуцированного 5-аминолевулиновой кислотой, в клеточных линиях A549, HeLa и 3T3 методом конфокальной флуоресцентной микроскопии.	30
<i>Ж.В. Гудкина</i>	Напряжения несоответствия от дилатационных включений в полупроводниковых наногетероструктурах с угловыми границами	32
<i>А.С. Драгунова</i>	Исследование влияния безызлучательной рекомбинации в полупроводниковых меза-структурах различной квантовой размерности в структурах на основе GaAs	33
<i>Т.В. Иванова</i>	Методика создания гетероструктур из монослоев дихалькогенидов переходных металлов рекордных размеров и их оптические свойства	35

<i>А.А. Карпова</i>	Влияние Оже-рекомбинации с участием глубоких центров на квантовую эффективность светодиодов InGaN/GaN видимого диапазона	37
<i>О.Ю. Коваль</i>	Оптические свойства и структурные особенности массивов полифазных нитевидных нанокристаллов GaP _{1-x} N _x /GaP	38
<i>Н.А. Костина</i>	Оптические силы вблизи одномерного фотонного кристалла	40
<i>В.А. Кравец</i>	Сенсибилизация люминесценции боросиликатных стекол, активированных редкоземельными ионами, при облучении электронным пучком	41
<i>Д.В. Кунту</i>	Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в тонких пленках галфенола	43
<i>А.А. Кутузова</i>	Суперрезонансные состояния в кремниевых диэлектрических решетках	45
<i>Е.Э. Маслова</i>	Квазикристаллическая структура в режиме метаматериала	48
<i>М.Е. Муретова</i>	Влияние асимметричных барьерных слоев на паразитную рекомбинацию в лазерной гетероструктуре	50
<i>Г.А. Сапунов</i>	Процессы формирования и оптические свойства эпитаксиальных наночастиц GaAs на Si	51
<i>А.Д. Синельник</i>	Собственная локализация света в трехмерных икосаэдрических квазикристаллах	53
<i>Р.Р. Ситдинов</i>	Влияние эффектов спинового взаимодействия на угловые зависимости основных параметров ЭПР в компенсированных полупроводниках	55
<i>О.О. Смирнова</i>	Экситонные свойства многослойных нанотрубок и нанопластин на основе MoS ₂	56

<i>О.С. Соболева</i>	Экспериментальная оценка параметров локализации тока в низковольтных полупроводниковых гетероструктурах	58
<i>А.В. Суслов</i>	Влияние плоскостной деформации растяжения на гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}$	60
<i>А.А. Таланин</i>	Исследование эффектов намагничивания методом электронного спинового резонанса в Si:P, компенсированном радиационными дефектами	62
<i>П.А. Тонкаев</i>	Увеличение скорости излучательной рекомбинации в резонансной частице свинцово-галлоидного перовскита	64
<i>К.С. Фризюк</i>	Связанные состояния в континууме с точки зрения мультипольного разложения	65

Оптически-возбуждаемые спиновые волны в системе двух динамически-связанных ферромагнитных слоев

П.И. Геревенков

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

Одним из перспективных направлений современного магнетизма является изучение прецессии намагниченности и распространяющихся спиновых волн для применения в устройствах спинтроники [1]. В связи с этим особый интерес представляют физические механизмы, позволяющие управлять параметрами прецессии намагниченности и возбуждаемых спиновых волн. Одним из таких механизмов управления является эффект динамической связи в структурах типа псевдо-спинового затвора ферромагнетик/немагнитный металл/ферромагнетик [2]. Недавно было показано, что в таких структурах возбуждение сверхкоротким лазерным импульсом приводит к формированию коллективных мод однородной прецессии намагниченности вследствие взаимной спиновой накачки между двумя ферромагнитными слоями [3].

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния эффекта динамической связи на параметры оптически-индуцированных распространяющихся спиновых волн в структуре типа псевдо-спинового затвора $\text{Fe}_{0,81}\text{Ga}_{0,19}/\text{Cu}/\text{Fe}_{0,81}\text{Ga}_{0,19}$. Эпитаксиальные металлические плёнки ферромагнитного сплава галфенола (FeGa) характеризуются малым затуханием и значительной длиной распространения спиновых волн [3]. Для изучения влияния динамической связи между слоями галфенола использовались экспериментальные методики Мандельштам–Бриллюэновского рассеяния света и двухцветной оптической накачки-зондирования с пространственно-временным разрешением. Это позволило получить информацию о некогерентных тепловых магнонах в экспериментах по рассеянию и о когерентных спиновых волнах при импульсном оптическом возбуждении. Отличительной чертой работы является успешное совмещение данных методик и анализ параметров оптически возбуждаемых спиновых волн с высоким пространственным и временным разрешением.

В работе продемонстрировано существование двух мод спиновых волн в данной структуре, локализованных преимущественно в отдельных слоях галфенола. При этом на пространственно-временных зависимостях магнитооптического отклика в экспериментах по методике накачка-зондирование на-

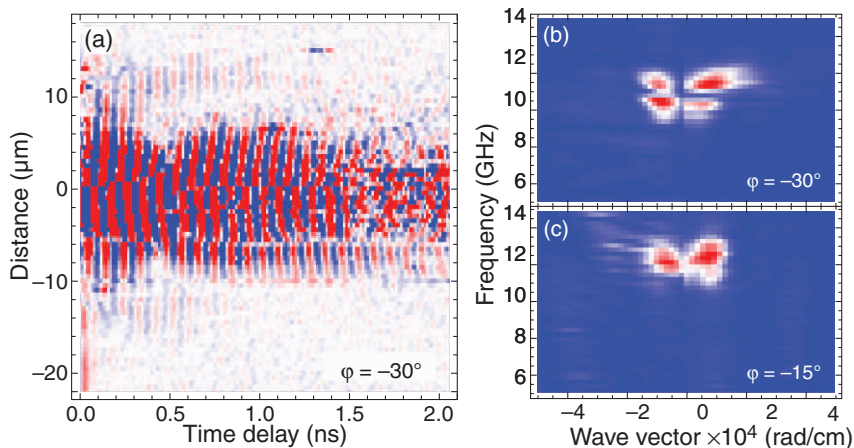


Рис. 1. (a) Пространственно-временная зависимость магнитооптического отклика в измерениях по методике накачка-зондирование при значении угла φ между внешним магнитным полем и осями лёгкого намагничивания образца -30° и (b,c) дисперсионные зависимости, полученные двухмерным преобразованием Фурье пространственно-временных зависимостей при $\varphi = -30$ и -15° , соответственно. Внешнее магнитное поле 100 мТл приложено в плоскости образца, сканирование производилось в направлении, перпендикулярном внешнему магнитному полю, плотность накачки составляла 3 мДж/см².

блюдаются биения (Рис. 1a). На дисперсионных зависимостях, получаемых из пространственно-временных зависимостей двухмерным преобразованием Фурье, двум модам соответствуют две ветви дисперсии (Рис. 1b). Показано, что при определенных значениях угла φ между внешним магнитным полем и осями лёгкого намагничивания образца воздействие фемтосекундного лазерного импульса приводит к синхронизации прецессии намагниченности в слоях галфенола за счет эффекта спиновой накачки [3]. В этом случае дисперсия магнитостатических волн в структуре имеет только одну ветвь (Рис. 1c). При этом наличие динамической связи ограничивает диапазон возбуждаемых волновых чисел для коллективной моды.

Автор выражает благодарность Н.Е. Хохлову, Я.А. Филатову, В.Д. Бесонову, А.W. Rushforth, А.В. Телегину и А.М. Калашниковой за их вклад в эту работу. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-02-00824, № 20-32-70149).

Литература

- [1] С.А. Никитов, и др. *Усп. физ. наук* **185** 1099 (2015).

- [2] B. Heinrich, *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **90** 187601 (2003).
[3] A.P. Danilov, *et al*, *Phys. Rev. B* **98**, 060406(R) (2018).
[4] N.E. Khokhlov, *et al*, *Phys. Rev. Appl.* **12**, 044044 (2019).

Оптический отклик плазменного кристалла: индуцированный ток переход от поглощения к усилению

И.В. Горбенко

ФТИ им. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия

Как было предсказано около 25 лет назад [1], постоянный ток, протекающий в канале полевого транзистора (ПТ), может стать нестабильным. Нестабильность приводит к генерации плазменных колебаний, частота которых зависит от напряжения на затворе и для типичных размеров современных ПТ, попадает в интересный для приложений терагерцовый (ТГц) интервал частот. В свою очередь, плазменные колебания должны приводить к излучению, т.е. транзистор может работать как источник ТГц излучения. Также было показано, что нелинейные свойства плазменных волн в канале полевого транзистора позволяют использовать прибор и в качестве детектора ТГц излучения [2]. Плазменные ТГц детекторы — это компактные и легко настраиваемые приборы, однако чувствительность ТГц детекторов на основе полевых транзисторов с одним затвором все еще довольно низкая из-за слабой связи с излучением. По той же причине до сих пор не удалось обнаружить в эксперименте ТГц излучение от одиночного ПТ. Возможный способ улучшить чувствительность детекторов, а также создать условия для наблюдения индуцированного током ТГц излучения, состоит в использовании периодических структур вместо отдельных полевых транзисторов. Совсем недавно были получены предварительные результаты по усилению излучения в таких структурах при комнатной температуре [3]. Данная работа — попытка дать качественное объяснение данным результатам.

Периодические плазменные структуры могут описываться моделью одномерных (1D) плазменных кристаллов [4]. В данной работе мы исследуем оптический отклик такого 1D плазменного кристалла на ТГц излучение в присутствии управляющего постоянного тока. Плазменный кристалл моделировался 2D-структурой с двумя системами затворов (multifinger double

gated structure), которые создают периодическую модуляцию плотности и, как следствие, скорости плазменных волн. Была рассмотрена задача, в которой структура освещалась излучением с большой длиной волны, так что поле излучения считалось однородным. Это поле возбуждает плазменные колебания с разными частотами в разных областях периодической структуры. Также предполагалось, что через систему протекает постоянный ток. Задача решалась на основе простейшей модели периодически чередующихся затворных полос, которые разграничивают области с разными скоростями плазменных волн: активные области с высокой скоростью плазменной волны и пассивные области с низкой скоростью плазменной волны. ТГц излучение, приложенное к такой структуре, возбуждает плазменные резонансы как в активной, так и в пассивной областях [4]. Ширина резонансов определяется скоростью релаксации импульса. При достаточно большом затухании резонансы в пассивных областях сильно перекрываются и остаются только (активные резонансы).

В таком режиме, был найден оптический отклик 1D плазменного кристалла на ТГц излучение, а именно, получено выражение для индуцированной светом поправки к диссипации энергии в канале. Было показано, что с увеличением постоянного тока поправка к диссипации энергии меняет знак, что означает усиление оптического сигнала.

Подводя итог, в настоящей работе изучено возбуждение плазменных колебаний в одномерном плазменном кристалле, через который протекает постоянный ток. Изучена индуцированная светом поправка к диссипации и показано, что она меняет знак, когда ток превышает некоторое критическое значение. Таким образом, предсказано индуцированное током усиление оптического сигнала в мультитворной системе. Полученный результат находится в качественном согласии с предварительными экспериментальными наблюдениями [2].

Литература

- [1] M. Dyakonov, M.S. Shur, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2465 (1996).
- [2] M.I. Dyakonov, M.S. Shur, *IEEE Trans. on Elec. Dev.* **43**, 380 (1996).
- [3] S. Boubanga-Tombet, W. Knap, *et al*, “Current driven plasmon instabilities and Terahertz amplification in Graphene”, in press (2019).
- [4] V.Yu. Kachorovskii and M.S. Shur, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 232108, 532 (2012).

Циркуляционные токи в высоковольтных пикосекундных лавинных переключателях

М.С. Иванов

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

Циркуляционные токи в быстродействующих лавинных переключателях разных типов (лавинных транзисторах [1], диодных обострителях [2], ударно-ионизационных динисторах и тиристорах [3]) возникают при пространственно-неоднородном переключении, которое является типичным для этого класса приборов. При развитии лавинной ионизации только на части площади приобретающая высокую проводимость активная часть прибора пропускает через себя электрический заряд пассивной части, обеспечивая тем самым снижение напряжения на структуре, т.е. собственно процесс переключения замыкающего ключа, приводящий к росту тока в полезной нагрузке. Направления протекания тока в активной и пассивной частях структуры противоположны. Таким образом, циркуляционный ток является внутренним током структуры, не попадающим во внешнюю цепь. Время протекания циркуляционного тока совпадает со временем переключения прибора — наиболее важным параметром ключа.

В настоящей работе с помощью численного моделирования исследованы циркуляционные токи, возникающие при пространственно-неоднородном переключении диодных обострителей импульсов — высоковольтных замыкающих ключей, основанных на эффекте задержанного ударно-ионизационного пробоя. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования указывает на неоднородность процесса переключения по площади структуры. Удовлетворительное согласие между расчетным и измеренным временем переключения достигается только в предположении, что переключение происходит на меньшей части площади структуры [2]. В случае однородного переключения время переключения определяется скоростью фронта ударной ионизации, которая в релевантных электрических полях 300–400 кВ/см не превосходит величины $3\text{--}5 v_s$ (здесь v_s — насыщенная дрейфовая скорость носителей), так что при типичной толщине прибора 100 мкм расчетное время однородного переключения заведомо больше 200 пс. При неоднородном переключении спад напряжения начинается после пробега фронта в активной части, а время переключения определяется временем разряда пассивной части прибора через активную часть. Это «внутреннее RC-время» зависит от соотношения площадей S_a и S_p активной и пассивной частей прибора. Согласие с экспериментально измеренным значением 100 пс [4] дости-

гается при соотношении $S_p/S_a \approx 4$. Проведенное нами моделирование указывает на необычные процессы перезарядки, протекающие в пассивной части прибора в течение примерно 1 нс уже после сверхбыстрого переключения. Например, на этом этапе направление электрического поля в обедненной базе p^+-n-n^+ структуры в прикатодной и прианодной частях противоположны. Эти процессы связаны с релаксацией обедненной диодной структуры к квазиравновесному состоянию, отвечающему низкому обратному напряжению. Численное моделирование неоднородного переключения, последовательно учитывающее циркуляционные токи и волновые эффекты в коаксиальном измерительном тракте, позволяет добиться хорошего согласия всех расчетных переходных процессов с экспериментальными.

Литература

- [1] S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **52**, 12, 2760-2768 (2005).
- [2] П.Б. Родин, А.М. Минарский, И.В. Грехов, *Письма в ЖТФ*, **38**, 11, 78-87 (2012).
- [3] А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов, *ФТП*, **51**, 5, 680 (2017).
- [4] V. Brylevskiy, I. Smirnova, A. Gutkin, *et al*, *J. Appl. Phys.*, **122**, 18, 185701 (2017).

Исследование лазерной генерации перенесенных на подложку кремния микролазеров с активной средой на основе квантовых точек InAs/InGaAs

С.А. Кадинская

СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

Микродисковые лазеры привлекают к себе широкое внимание в силу перспективности их использования в качестве сверхмалых источников излучения [1]. Преимуществами таких лазеров являются высокая добротность, простота изготовления, малый размер, низкие пороговые токи и латеральный вывод излучения [2]. Тем не менее, непрямозонность доминирующего в современной микроэлектронике кремния существенно затрудняет создание кремниевых излучателей, неуступающих по своим характеристикам лазерам на основе материалам АЗВ5, а методы синтеза и переноса АЗВ5 на кремний характеризуются технологической сложностью [3]. Таким образом, задача интеграции АЗВ5 микролазеров с кремниевыми чипами сохраняет свою актуальность. В данной работе продемонстрирована простая технология и представлены результаты исследований АЗВ5-микролазеров, перенесенных на подложку Si.

Гетероструктуры, использованные для создания микродисковых лазеров, были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подлож-

ках $n+$ GaAs (100). Активная область представляла собой 10 слоев КТ InAs/InGaAs, отделенных друг от друга слоями GaAs толщиной 30 нм и помещенные в нелегированный волноводный слой GaAs толщиной 0,4 мкм. Эмиттерные слои $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ n - и p -типа по обе стороны волновода имели толщину 2 мкм. Микрорезонаторы были сформированы методом плазменного травления. Верхние омические контакты были сформированы с помощью AgMn/NiAu металлизации и имели круглую форму. Нижний сплошной контакт к $n+$ подложке был сформирован с помощью металлизации AuGe/Ni/Au. Далее структура верхними p контактами совмещалась с контактными площадками из индия на кремниевом чипе и подвергалась нагреву для склеивания.

Измерения лазерных характеристик проводились в непрерывном режиме при комнатной температуре. Излучение электролюминесценции вводилось в оптоволокно и поступало в оптический анализатор спектров Yokogawa AQ6370C.

На спектрах наблюдались узкие резонансные линии, соответствующие модам шепчущей галереи. Для микролазера с диаметром резонатора 40 мкм пороговый ток составил 10 мА, а добротность, оцененная на пороге лазерной генерации, составила более 90 000, что соответствовало значениям до переноса на кремний.

Таким образом, перенос микролазеров на кремниевую подложку не приводит к ухудшениям характеристик микролазеров. Технология механического крепления микрорезонаторов на поверхность Si может быть перспективной для гибридной интеграции микролазеров с элементами кремниевых фотонных схем.

Литература

- [1] Srinivasan, Kartik, *et al*, *Opt. Express* **14** (3) 1094–1105 (2006).
- [2] Y. Arakawa, and H. Sakaki. *Appl. Phys. Lett.* **40** (11) 939–941 (1982).
- [3] J. Van Campenhout *et al*, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** (16) 1345–1347 (2008).

Кулоновские эффекты в поглощении и фототоке в системах с дираковским спектром

Н.В. Лепшенен

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящий момент в физике конденсированного состояния активно изучаются двумерные и трехмерные системы, в которых носители заряда обладают дираковским энергетическим спектром. Интерес к ним связан с уникаль-

ными оптическими и электрическими свойствами и с тем, что они расширяют представления топологической теории в физике твердого тела. Например, в вейлевских полуметаллах — трехмерных системах, описываемых эффективным гамильтонианом Вейля, который получается расщеплением конуса Дирака для безмассовых частиц, возможен циркулярный фототок, инвертирующий свое направление при смене знака круговой поляризации. При отсутствии плоскостей отражения циркулярный фототок направлен вдоль момента фотона, и его темп генерации определяется, помимо напряженности электрического поля волны, мировыми постоянными. Нелинейный по интенсивности циркулярный фототок зависит от соотношения времён энергетической и импульсной релаксации фотоносителей и при больших интенсивностях нарастает линейно по амплитуде световой волны [1].

Рассмотрено влияние эффектов кулоновского взаимодействия на фототок. Мы получили аналитически поправку первого порядка по квадрату заряда электрона, которая учитывает одночастичную перенормировку энергии из-за взаимодействия, приводящую к вогнутости спектра и описываемую поправкой к скорости. Эта поправка содержит логарифмически расходящийся вклад, однако, помимо этого, необходимо учесть поправку к матричному элементу из-за кулоновского электрон-дырочного рассеяния. Данный вклад тоже содержит большой логарифм и сокращает расходящийся вклад в фототок от перенормировки скорости. Для того, чтобы проанализировать следующие поправки используется метод ренормгруппы. Получившийся ответ мал, что свидетельствует об устойчивости фототока к кулоновскому взаимодействию.

Мы проанализировали влияние кулоновских эффектов на поглощение в дираковском спектре с ненулевой шириной запрещенной зоны. Поставленная задача двух тел не сводится к одночастичной задаче рассеяния дираковского электрона на кулоновском центре из-за непараболичности спектра. Для анализа силы осциллятора экситонных состояний, а также поправки к поглощению при оптических переходах между состояниями непрерывного спектра, так называемого фактора Зоммерфельда, были численно получены волновые функции уравнения Дирака для двух частиц, связанных кулоновским взаимодействием. Полученные зависимости регулируются значением постоянной тонкой структуры в дираковском материале, которая получается из постоянной тонкой структуры атома заменой скорости света на скорость фермионов. Продемонстрировано возрастание коэффициента поглощения света с ростом силы кулоновского взаимодействия.

Литература

- [1] N.V. Leppen, E.L. Ivchenko, L.E. Golub, *Phys. Stat. Sol. B* 1900305 (2019).

Коническая рефракция излучения гауссовского источника модели Шелла

В.Ю. Мыльников

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

Коническая рефракция (КР) — явление с почти двухсотлетней историей, представляющее собой преобразование двусным кристаллом пучка света, распространяющегося вдоль одной из оптических осей, в два полых световых конуса, один из которых сходится, а другой расходится относительно оси распространения [1]. В подавляющем большинстве современных работ по изучению конической рефракции в качестве источника излучения используются газовые или твердотельные лазеры [2], но для практического применения данного явления большой интерес представляет исследование конической рефракции излучения светодиодов, являющихся наиболее компактными, эффективными и недорогими источниками излучения. Однако, низкая пространственная когерентность светодиодов может значительно изменить характерные особенности КР, как было показано в работе [3]. В рамках данной работы была построена строгая теории КР излучения с частичной пространственной когерентностью. Для этого нами рассматривался гауссовский источник модели Шелла. Замечательная особенность данного источника состоит в том, что его корреляционную функцию можно представить в виде некогерентной суперпозиции полностью когерентных Лагерр-Гауссовых мод [4]. При этом коническую рефракцию таких когерентных мод можно описывать независимо с помощью интегралов КР, уже ставших классическими [5]. В результате, на основе разработанной нами модели, было показано, что уменьшение степени пространственной когерентности излучения приводит к исчезновению интерференционной картины, что хорошо согласуется с результатами эксперимента и феноменологической теорией, которые были получены в работе [3]. Однако, наиболее важным результатом стало обнаружение эффекта сужения ширины колец КР при уменьшении степени когерентности излучения, что является новым нетривиальным результатом и не может быть получено в рамках феноменологической модели низко когерентной КР [3]. Для объяснения контринтуитивной зависимости ширины конуса от степени когерентности, нами были рассмотрены асимптотические выражения для интенсивности колец КР, из которых следует, что, при уменьшении степени когерентности света,

происходит эффективное уширение фурье-спектра конусов КР, что в полной мере объясняет сужение в прямом пространстве. Также, в рамках работы, были проанализированы угловые и радиальные корреляции излучения и распространение конусов КР в пространстве. Таким образом, нами была построена строгая теория КР света с частичной пространственной когерентностью, которая находится в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными, и предсказывает контринтуитивный эффект сужения ширины кольца при уменьшении степени когерентности излучения.

Литература

- [1] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Cambridge University, 1999).
- [2] A. Turpin, Y.V. Loiko, T.K. Kalkandjiev, *et al*, *Laser Photonics Rev.* **10** (5), 750–771 (2016).
- [3] V.Yu. Mylnikov, S.N. Losev, V.V. Dudelev, *et al*, *Opt. Express* **27** (18), 25428–25435 (2019).
- [4] L. Mandel and E. Wolf, *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge University, 1995)
- [5] M.V. Berry, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** (4), 289–300 (2004)

Оптические свойства содержащих ионы европия многослойных структур, сформированных золь-гель методом

Д.А. Парафинюк

БГУИР, Минск, Республика Беларусь

Многослойные периодические структуры, представляющие собой брэгговские отражатели, интерференционные фильтры, и так называемые одномерные фотонные кристаллы [1], сформированные золь-гель методом [2], также могут содержать ионы европия, в качестве активатора люминофора, Изучаемые структуры представляют прикладной интерес для микроэлектроники, оптоэлектроники, нанофотоники и могут использоваться в качестве лазерных зеркал, просветляющих и антиотражающих покрытий, интерференционных фильтров, волноводов и др.

Для формирования многослойных структур использовали золи титаната бария, в том числе, легированные ионами европия, и оксида кремния [3]. Сформированные структуры отличались количеством слоев и условиями синтеза [4].

Обнаружено влияние концентрации ионов европия на интенсивность люминесценции готовой структуры, что имеет значение при оптимизации технологии изготовления люминофоров. Также наблюдается зависимость интенсивности люминесценции от температуры отжига многослойных структур.

Обнаружена зависимость оптических свойств (отражение и пропускание) многослойных структур от характера структуры: многослойная структура формирует фотонную запрещенную зону в видимом диапазоне видимых длин волн [5,6], а при увеличении количества слоев в структуре — в длинноволновой области оптического диапазона, таким образом позволяет создавать интерференционные фильтры, способные перераспределять направление излучения в структуре.

Литература

- [1] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58**. 20–59 (1987).
- [2] S. Sakka, *T. Indian Ceram. Soc.* **46** (1). 1–11 (1987).
- [3] J. Bellessa, S. Rabaste, J.C. Plenet, *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 21–42 (2001).
- [4] N. Gaponenko *et al*. *Phys. Solid State* **61** (3). 397–401 (2019)
- [5] G. Guida, A. de Lustrac, A. Priou. *Prog. Electromagn. Res.* **41**. 1–20 (2003).
- [6] R.M. Almeida, S. Portal. *Curr. Opin. Solid St. M.* **7** (2) 151–157 (2003).

Оптическое возбуждение циркулярных токов и обратный плазмонный эффект Фарадея в двумерной электронной жидкости

С.О. Поташин

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

Характерные размеры современных оптоэлектронных устройств уже достигли нескольких нанометров и продолжают уменьшаться. На таких масштабах важную роль начинают играть явления, связанные с электрон-электронным взаимодействием, в том числе, эффекты, обусловленные возбуждением плазмонов. Это объясняет всплеск интереса к плазмонике, области, которая представляет чрезвычайный интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и в контексте весьма широкого спектра возможных приложений. Одно из весьма интересных явлений, где достаточно ярко могут проявляться плазмонные эффекты—обратный эффект Фарадея (ОЭФ). Суть эффекта состоит в том, что циркулярно поляризованная электромагнитная волна может возбуждать циркулярный токи, которые приводят к возникновению магнитного момента, т.е. к оптически-индуцированному намагничиванию среды.

Простейшим примером системы, где наблюдается ОФЭ, является квантовое кольцо [1,2]. Циркулярно-поляризованное излучение индуцирует диамагнитный, поляризационно-чувствительный постоянный ток в кольце, и следовательно, магнитный момент. В кольце с высокой подвижностью циркулярный постоянный ток многократно увеличивается вблизи плазменных резонансов, что приводит к возникновению гигантского ОЭФ [2].

В данной работе мы рассматриваем возникновение «закрученных» (twisted) плазменных мод в двумерной электронной жидкости (ДЭЖ), возбуждаемых через периодический массив металлических шариков, находящихся в прозрачной диэлектрической матрице. За счет воздействия циркулярно поляризованной волны в каждом шарике возбуждается вращающийся диполь, который, в свою очередь, возбуждает циркулярную плазменную волну в окрестности шарика. За счет гидродинамических нелинейностей, существующих в ДЭЖ, плазменные волны выпрямляются и возникает поляризационно-чувствительный циркулярный ток и, как следствие, магнитный момент. Наиболее интересным нетривиальным результатом является многократное резонансное усиление тока за счет того, что металлические шарики образуют периодическую решетку. Эффект резонансного плазмонного усиления в такой периодической системе наблюдается при совпадении волнового вектора плазмонного возбуждения с вектором обратной решетки. Описанный плазмонный механизм может интерферировать с однородным друдевским возбуждением. Поэтому предсказанные в данной работе острые плазмонные резонансы имеют несимметричную форму, аналогичную хорошо известным резонансам Фано. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для оптической намагнитченности двумерных систем и для перестраиваемых детекторов и модуляторов излучения, в том числе в важном для приложений терагерцовом интервале частот.

Литература

- [1] K.L. Koshelev, V.Yu. Kachorovskii, M. Titov, *Phys. Rev. B* **92**, 235426 (2015).
- [2] K.L. Koshelev, V.Yu. Kachorovskii, M. Titov, M.S. Shur, *Phys. Rev. B* **95**, 035418 (2017).

Фононы в кристаллическом и аморфном графене

И.О. Райков

СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются характерные колебательные свойства кристаллического и аморфного графена. Последний, как и кристаллический графен, представляет собой моноатомный плоский слой атомов углерода, в котором

каждый атом связан валентной sp^2 связью с тремя своими ближайшими соседями в двумерной гексагональной решетке. Как известно, гармонические колебания атомов в идеальной кристаллической решетке описываются с помощью понятия о фононах. Фонон — квазичастица, обладающая энергией $\hbar\omega$, где ω — частота фонона, и квази-импульсом $\hbar\mathbf{q}$, где \mathbf{q} — волновой вектор фонона. Частота фонона является некоторой функцией его волнового вектора $\omega \equiv \omega(\mathbf{q})$. Зависимость ω от \mathbf{q} называется законом дисперсии. Он зависит от характера взаимодействия атомов в кристалле и от типа колебаний, которые определяются выбором той или иной колебательной степени свободы.

Аморфный графен похож на кристаллический тем, что в нем сохраняется такой же ближний порядок расположения атомов, как и в кристаллическом графене (то есть валентные связи в нем не нарушены), но в нем, в силу имеющегося беспорядка, не сохраняется дальний порядок. Флуктуируют, например, длины валентных связей и углы между ними [1]. В силу этого колебательный спектр аморфного графена отличается от такового у кристалла. И возникает интересный вопрос, применим ли к колебаниям в аморфном графене термин фонон? Является ли волновой вектор \mathbf{q} хорошим квантовым числом при наличии беспорядка? Общепринято считать, что по крайней мере при малых частотах этот термин применим. В аморфных твердых телах распространяется звук. А при больших частотах? В настоящей работе дается ответ на этот вопрос. Мы подробно исследуем влияние беспорядка на сингулярности ван-Хова в графене [2–4], которые зависят от функции $\omega(\mathbf{q})$ и поэтому являются маркером такого физического понятия, как фонон. Сингулярности существуют, пока имеет смысл функция $\omega(\mathbf{q})$. При большом беспорядке, как мы показываем в работе, этот термин теряет свой первоначальный смысл. При увеличении степени беспорядка из двух логарифмических сингулярностей в графене не выживает ни одна. Мы показываем в работе, что разрушение сингулярностей ван-Хова связано с нарушением критерия Иоффе–Регеля. Длина волны фонона $\lambda = 2\pi/q$ сравнивается с его длиной свободного пробега $l = v\tau$, где τ — время свободного пробега фонона.

Литература

- [1] W.H. Zachariasen, *J. Am. Chem. Soc.* **54**, 3841 (1932).
- [2] И.О. Райков, Д.А. Конюх, Д.А. Паршин, 21 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 25–29 ноября 2019 Санкт-Петербург, Тезисы докладов, 123.
- [3] И.О. Райков, Д.А. Конюх, Д.А. Паршин, Неделя Науки СПбПУ, материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г., Институт физики, нанотехнологий и теле-коммуникаций. СПб.: Политех-Пресс, 2019. 172–173.

- [4] И.О. Райков, Д.А. Паршин, Д.А. Конюх, Бозонный пик в аморфном графене, в рамках модели устойчивых случайных матриц, *Письма в ЖЭТФ*, submitted.

Спонтанный магнитодиэлектрический эффект в антиферромагнитном фториде кобальта CoF_2

Н.В. Сиверин

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

Связь между диэлектрическими и магнитными свойствами представляет фундаментальный интерес для физики конденсированного состояния. Аномалии диэлектрических свойств, наблюдающиеся при магнитных фазовых переходах, а также возможность управления диэлектрической проницаемостью внешними магнитными полями открывают широкие перспективы для потенциальных применений [1]. В данной работе проведено комплексное экспериментальное исследование диэлектрических свойств тетрагонального антиферромагнетика CoF_2 обладающего структурой рутила (пространственная группа $R4_2/mnm$, #136, $Z = 2$) в интервале температур 5–300 К, охватывающем температуру Нееля $T_N = 38$ К. Магнитные свойства данного кристалла определяются сильно анизотропным ионом Co^{2+} ($3d^7$ оболочка, $S = 3/2$, $L = 3$), обладающим самым сильным спин-орбитальным взаимодействием среди $3d^n$ ионов.

Получены экспериментальные температурные зависимости низкочастотной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T)$ в диапазоне 75 Гц–1 МГц, для двух неэквивалентных кристаллографических направлений. Обнаружен излом на зависимостях $\varepsilon(T)$ при температуре антиферромагнитного упорядочения, ниже которой вдоль тетрагональной оси c диэлектрическая проницаемость увеличивается, а вдоль оси a уменьшается. Данные отклонения $\varepsilon(T)$ ниже T_N хорошо аппроксимируются спин-спиновой корреляционной функцией, т.е. квадратичны по магнитному параметру порядка, что свидетельствует о том, что они вызваны спонтанным магнитодиэлектрическим (МД) эффектом. При этом величины спонтанного МД эффекта относительно значения при T_N составили $\Delta\varepsilon^{\text{MD}} = -0.43\%$ и 0.22% , вдоль оси a и c , соответственно. Разный знак спонтанного МД эффекта вдоль неэквивалентных кристаллографических направлений, по-видимому, свидетельствует о нетривиальной спин-фононной связи в данном антиферромагнетике.

Статическая диэлектрическая проницаемость в кристаллах диэлектриков определяется ИК-активными фононами. Для выявления природы разного зна-

ка спонтанного МД эффекта было проведено экспериментальное исследование поляризованных спектров инфракрасного отражения в диапазоне 30–700 см⁻¹ при различных температурах. Аппроксимация спектров при помощи факторизованной функции диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega)$ позволила получить температурные зависимости поперечных (TO) и продольных (LO) частот фононов с симметриями E_u и A_{2u} . Установлено, что частоты некоторых фононов испытывают сдвиг ниже T_N в результате спин-фононного взаимодействия. При этом фононы с симметрией E_u , поляризованные вдоль оси a , ужесточаются, в то время как A_{2u} фонон, поляризованный вдоль оси c смягчается. Анализ полученных данных позволил установить, что разный знак спонтанного МД эффекта, обнаруженный в CoF₂, связан с особенностями динамики решетки и вызван спин-решеточным взаимодействием фононов разной симметрии, как было показано в работе [2].

Автор выражает благодарность соавторам данного исследования Р.М. Дубровину, К.Н. Болдыреву и Р.В. Писареву. Работа поддержана грантом РФФИ 16-12-10456.

Литература

- [1] B. Lorenz *et al*, *Phys. Rev. B* 70, 212412 (2004).
- [2] R. M. Dubrovin *et al*, *Phys. Rev. B* 100, 024429 (2019).

Влияние градиента температуры на параметры лазерно-индуцированных магнитостатических волн

Я.А. Филатов

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

В современном магнетизме сформировано быстро развивающееся направление — магنونика, занимающееся исследованием физических процессов, связанных с распространением спиновых волн [1]. Одним из наиболее гибких способов исследования магнитной динамики является методика полностью оптического возбуждения и детектирования [2]. Представляемая работа является развитием исследования [2], в котором продемонстрировано возбуждение распространяющихся спиновых волн в тонких пленках ферромагнитного сплава галфенола (Fe_{0.81}Ga_{0.19}) за счет сверхбыстрого термического изменения магнитной анизотропии фемтосекундными лазерными импульсами.

Возбуждение и распространение поверхностных магнитостатических волн в плёнках галфенола исследовалось с применением методики двухцветной

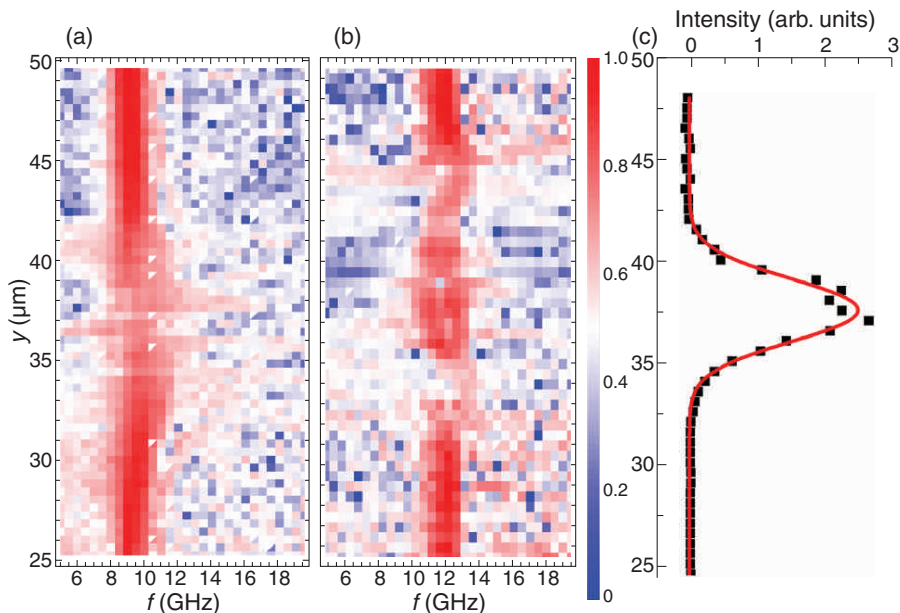


Рис. 1. Изменение частоты спиновых волн с расстоянием вблизи пятна возбуждения: (a) и (b) углы между приложенным внешним магнитным полем и осью легкого намагничивания 45° и 15° , соответственно; (c) пространственный профиль возбуждающего пятна

накачки-зондирования с временным и пространственным разрешением. Образцы помещались во внешнее постоянное магнитное поле, направленное в плоскости пленки. Распространяющаяся спиновая волна в пленках возбуждалась 120 фс лазерными импульсами и регистрировалась за счет измерения полярного магнитооптического эффекта Керра с временным и пространственным разрешением.

В ходе анализа полевых и азимутальных зависимостей параметров спиновых волн выяснено, что создаваемый градиент температуры внутри и вблизи области образца, возбуждаемой лазерным импульсом, влияет на параметры спиновых волн. Отмеченное влияние вызвано температурной зависимостью параметров анизотропии материала, причём характер этой зависимости определяется как градиентом температуры, так и направлением внешнего магнитного поля относительно осей магнитокристаллической анизотропии образца. В частности, показано (Рис. 1), что в зависимости от взаимной ориентации

внешнего магнитного поля и осей анизотропии пленок можно наблюдать как увеличение, так и уменьшение волнового числа возбуждаемых магнитостатических волн.

Автор выражает благодарность Н.Е. Хохлову, П.И. Геревенкову, Л.А. Шелухину, А.В. Азовцеву и А. М. Калашниковой за их вклад в эту работу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-02-00824 и № 20-32-70149).

Литература

- [1] С.А. Никитов, и др. *Усп. физ. наук* **185** 1099 (2015).
- [2] T. Satoh, *et al*, *Nat. Photon.* **6** 662 (2012).
- [3] N.E. Khokhlov, *et al*, *Phys. Rev. Appl.* **12**, 044044 (2019).

Управление фотолуминесценцией квантовых точек CdSe/ZnS в гибридных структурах с плазмонными наночастицами

Д. Хмелевская

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Управление интенсивностью фотолуминесценции (ФЛ) наноструктур актуально при создании фотонных устройств, а также для оптоэлектронных и биосенсорных приложений. Научный и практический интерес вызывает экситон-плазмонное взаимодействие полупроводниковых квантовых точек и наночастиц (НЧ) металла, возникающее под действием электромагнитного излучения [1].

На интенсивность ФЛ КТ в ближнем поле плазмонных НЧ влияют положение пика локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР), степень перекрытия спектров поглощения НЧ и эмиссии КТ, а также расстояние между ними [2]. Достигнуть более полного перекрытия спектров можно путем сдвига ЛППР пика в гибридной металлической наноструктуре с диэлектриком. Смещение ЛППР пика в синюю область спектра было получено в гибридных структурах Au НЧ/а-С:Н в результате вариации ширины оптической щели [3], а также в результате их отжига [4]. Основная цель исследовательской работы заключалась в получении многократно плазмон-усиленной ФЛ КТ CdSe/ZnS в ближнем поле Au НЧ в тонкопленочной гибридной структуре

с аморфным гидрогенизированным углеродом (а-С:Н). КТ помещались в полимерную матрицу, что обеспечило уменьшение безызлучательного переноса энергии на поверхности Au НЧ. Эффективное расстояние между КТ и металлическими НЧ достигалось путем вариации концентрации ПММА в растворе. Оптимальное перекрытие спектров люминесценции КТ и поглощения металлических НЧ было достигнуто в результате смещения максимума ЛППР в синюю область спектра путем отжига гибридной структуры Au НЧ/а-С:Н.

Полупроводниковые гидрофобные КТ CdSe/ZnS типа ядро-оболочка с диаметром ядра 3 нм и оболочке ТОРО были получены методом высокотемпературного металлоорганического синтеза [5]. Раствор КТ смешивался с ПММА в интервале концентраций 0.7–3.3 мг/мл механически в течение 2 часов, а за тем в ультразвуковой ванне 15 минут перед нанесением на поверхность гибридной структуры Au НЧ/а-С:Н на кварцевой подложке. Спектры фотолюминесценции КТ и КТ в матрице ПММА записывались на конфокальном сканирующем микроскопе (LSM 710, Carl Zeiss, Германия) на длине волны возбуждающего света 405 нм при комнатной температуре. Тонкопленочная гибридная структура была получена путем осаждения гранулированной золотой пленки на поверхность пленки а-С:Н. Пленка а-С:Н осаждалась на полированную кварцевую подложку из паров толуола в плазме тлеющего разряда на постоянном токе, поддерживаемом магнетронной плазмой, при комнатной температуре. Толщина пленки а-С:Н составляла около 50 нм. Гранулированная наноструктурированная Au пленка с эффективной толщиной 2 нм была получена термическим испарением в вакуумной камере (PVD 75, Kurt J. Lesker Company) при остаточном давлении 10⁻⁷ Торр и комнатной температуре. Спектры оптической плотности образцов измеряли на спектрофотометре (СФ-56, ЛОМО, Санкт-Петербург, Россия).

Плазмонное усиление интенсивности ФЛ полупроводниковых КТ CdSe/ZnS, включенных в прозрачную диэлектрическую матрицу ПММА и осажденных на поверхности наночастиц Au в тонкопленочной гибридной структуре с а-С:Н, было получено при концентрации ПММА 3.3 мг/мл. Десятикратное плазмонное усиление интенсивности фотолюминесценции CdSe/ZnS было достигнуто при эффективном перекрытии в спектрах поглощения и эмиссии металлических НЧ и КТ соответственно. Результат был получен за счет сдвига плазмонного пика Au НЧ в синюю область спектра в результате отжига гибридной структуры Au НЧ/а-С:Н при температуре 300 °С в течение 10 минут. Полученные результаты демонстрируют плазмонное усиление интенсивности эмиссии CdSe/ZnS путем контроля эффективного расстояния между наночастицами, а также перекрытия в спектрах поглощения и испускания. Комбинация данных материалов и контроль их оптических свойств будут по-

лезны для управления ФЛ полупроводниковых КТ CdSe/ZnS при разработке высокочувствительных и эффективных оптических сенсоров для биомедицинских и других диагностических приложений.

Литература

- [1] J. Chen, K. Zidek, M. Abdellah, *et al*, *J. Phys.* **28**, 254001, (2016).
- [2] H. Wang, R. Zhang, Z. Ge, *et al*, *Nanoscale Res. Lett.* **10**, 128, (2015).
- [3] E.A. Konshina, D.P. Scherbinin, M.M. Abboud, *et al*, *Opt. Spectr.*, **125**, 290, (2018).
- [4] E.A. Konshina, D.P. Scherbinin, M.M. Abboud, *et al*, *Appl. Surf. Sci.*, **471**, 652, (2019).
- [5] A. Sukhanova, K. Even-Desrumaux, P. Chames, *et al*, *Nat. Protoc./Protoc. Exch.* DOI, **10**, (2012).

Термоэлектрические свойства CoSi и твердых растворов

Co_{1-x}M_xSi (M = Fe, Ni)

А. С. Антонов

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

Термоэлектрические преобразователи энергии находят широкое применение в различных областях деятельности человека, а в ряде случаев являются незаменимыми. Моносилицид кобальта вызывает интерес тем, что обладает одним из самых высоких значений коэффициентов термоэдс среди полуметаллов, а также обладает хорошими механическими характеристиками, которые остаются стабильными при высоких температурах [1]. Кроме того, данный материал не содержит дорогих и токсичных компонентов.

Концентрация носителей заряда в моносилициде кобальта может быть изменена путем сплавления с моносилицидами никеля или железа. FeSi и CoSi формируют непрерывную серию твердых растворов, в то время как растворимость NiSi в CoSi ограничена 10 ат.%. При замене атомов кобальта атомами никеля происходит увеличение концентрации электронов, а при замене атомов кобальта на железо происходит ее уменьшение [2].

Чтобы повысить термоэлектрическую эффективность материала, необходимо иметь четкое представление об энергетическом спектре носителей тока. Недавние расчеты зонной структуры моносилицида кобальта [3,4] выявили ряд отличий от стандартной, для полуметаллических соединений, модели с энергетическим перекрытием параболических зон электронов и дырок. Более

того, эти исследования показали, что данный материал относится к классу веществ с нетривиальной топологией зонной структуры. Эти открытия возбудили новую волну интереса к данной группе материалов, а также потребовали модификации использованных ранее методов описания их транспортных свойств.

В данной работе были исследованы образцы моносилцида кобальта и его твердых растворов с FeSi и NiSi. Исследовался диапазон составов с содержанием железа до 30 ат.% и никеля до 10 ат.%. В ходе исследования были получены температурные зависимости термоэдс и электропроводности в диапазоне 100–800 К. В работе проанализирована возможность использования различных моделей электронного спектра и механизмов рассеяния носителей заряда для интерпретации экспериментальных температурных и концентрационных зависимостей термоэдс и электропроводности.

Литература

- [1] П.В. Гельд, Ф.А. Сидоренко, *Силициды переходных металлов четвертого периода*, 584 (1971).
- [2] M.I. Fedorov, V.K. Zaitsev, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, 321–328 (1995).
- [3] A. Sakai, F. Ishii, Y. Onose, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76**, 1–4 (2007).
- [4] D.A. Pshenay-Severin *et al*, *J. Phys. Condens. Matter*, **30**, 7 (2018).

Особенности структуры нитевидных нанокристаллов CuO по данным электронной микроскопии

М.С. Берминова

СПбПУ Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

Нитевидные нанокристаллы (ННК) — это кристаллы с высоким аспектным соотношением — отношение длины к диаметру может достигать значений 100–1000, причем при этом их диаметр зачастую не превышает 100 нм. Ввиду своих уникальных механических, химических и электрических свойств ННК являются предметом детального научного исследования [1]. Среди широкого многообразия ННК особого внимания заслуживают оксиды металлов, в частности, оксид меди (CuO).

В природе объёмный CuO встречается в виде минерала тенорита чёрного цвета. Тенорит имеет моноклинную кристаллическую решётку и является полупроводником с шириной запрещенной зоны 1.2 эВ и проводимостью р-типа.

На данный момент ННК CuO являются не только предметом пристального научного интереса и перспективным материалом с уникальными свойствами,

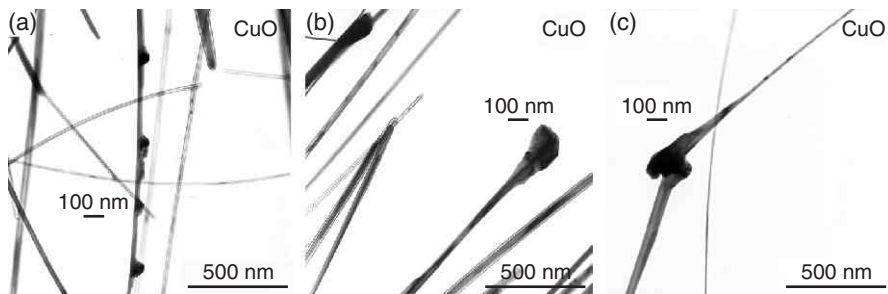


Рис. 1. ПЭМ изображения ННК оксида меди. Наблюдаются структурные особенности: (а), (b) скачкообразное изменение диаметра, (с) перегибы

но и уже находят широкое практическое применение в самых различных областях, в частности, CuO ННК являются востребованным материалом для таких направлений, как очистка сточных вод от органических загрязнений, катализ и фотокатализ; широко применяются в производстве датчиков газа, фотодатчиков, электродов и других приборов [2]. Отмечается, что для катализа и фотокатализа большое значение могут играть структура и морфология поверхности кристаллов CuO [3].

ННК оксида меди могут быть получены различными методами роста, в том числе методами жидкофазного и газофазного роста [4], в отличие от которых метод отжига или термического окисления является наиболее широко распространённым, в силу своей дешевизны и простоты [5,6].

Согласно литературным данным, ННК оксида меди, сформированные методом термического окисления, могут встречаться как в монокристаллическом виде, так и как бикристаллы (состоять из двух кристаллов) [6,7]. В большинстве таких работ указывается на двойникование кристаллов, с плоскостью двойникования, проходящей вдоль всей длины нитевидного бикристалла [7,8]

Несмотря на значительный объём проведённых исследований и публикаций, вопрос формирования ННК оксида меди методом термического окисления остаётся открытым. Так, например, в работе [7] рассматривается модель диффузии ионов меди в нитевидном бикристалле по границе $(11\bar{2})/(001)$, пронизывающей весь ННК, в то время как в работе [7] *in situ* показывается, что рост ННК начинается на краю излома фасеток $(1\bar{1}1)$ и $(\bar{1}11)$ бикристалла, где они смыкаются на плоскости двойникования (001) , пронизывающей весь ННК. Таким образом, согласно [7] транспорт ионов меди к кончику нити осуществляется по границе двойникования (001) .

Целью данной работы является проведение детального ПЭМ исследования внутренней структуры ННК оксида меди и их морфологии, анализ механизма

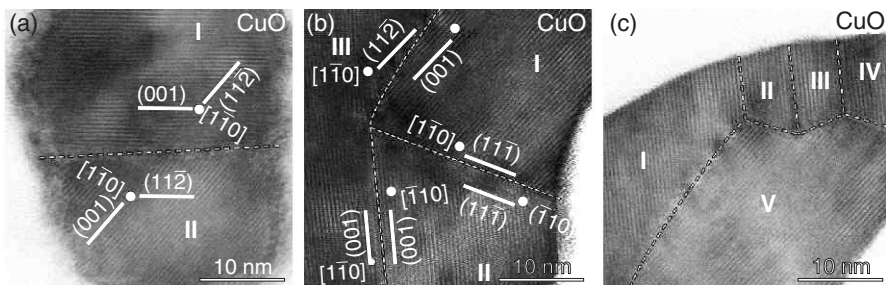


Рис. 2. ВРЭМ изображения поперечных сечений ННК оксида меди (а) бикристалла оксида меди вдоль направлений I $[1\bar{1}0]$ и II $[1\bar{1}0]$; (б) I, III $[1\bar{1}0]$ и II $[\bar{1}10]$; (с) мультикристалл

формирования ННК при их получении методом термического окисления. Для этой цели нами были выбраны ННК оксида меди, полученные методом термического окисления электролитического медного покрытия. Исходные медные покрытия получали методом электроосаждения металла из водного электролита на стальные сеточки. ННК формировались на поверхности в воздушной атмосфере при температурах отжига в интервале 250–600 °С и временах выдержки от нескольких минут до 4 часов. ПЭМ исследование ННК CuO выполнено на электронных микроскопах Philips EM420 (100 kV) и Jeol JEM-2100F (200 kV).

В работе приводятся результаты анализа ПЭМ и высокоразрешающих (ВРЭМ) изображений ННК CuO. Показано, что в процессе термического окисления медного покрытия сформировались ННК оксида меди длиной до 10 мкм и диаметром менее 100 нм. Наблюдаются отклонения от идеальности, например, перегибы, скачкообразное изменение диаметра (рис. 1).

Для ВРЭМ исследования внутренней структуры ННК, по специальной методике, были приготовлены поперечные сечения ННК CuO. Используя метод быстрого преобразования Фурье, было установлено, что в ННК CuO присутствует сопряжение по границе $(001)/(11\bar{2})$ (рис. 2а), двойникование по плоскостям (001) и $(11\bar{1})$, либо ННК могут иметь фасетированную границу (рис. 2б) между II и III, I и II и I и III, соответственно). Впервые установлено, что ННК CuO могут представлять собой не только бикристаллы, но и мультикристаллы, состоящие из нескольких нанокристаллов с границей раздела параллельной направлению роста (рис.2с).

Литература

- [1] B.Y. Xia *et al*, *Adv. Mater.*, **15** 5 353–389 (2003).
- [2] Q. Zhang *et al*, *Prog. Mater. Sci.*, **60** 1 208–337 (2014).

- [3] K. Zhou, R. Wang, B. Xu *et al*, *Nanotechnology*, **17** 15 3939–3943 (2006).
- [4] G. Filipic and U. Cvelbar, *Nanotechnology*, **23** 19 1-16 (2012).
- [5] A.M.B. Gonçalves, *J. Appl. Phys.*, **106** 3 1–5 (2009).
- [6] X. Jiang, T. Herricks, and Y. Xia, *Nano Lett.*, **2** 12 1333–1338 (2002).
- [7] B. J. Hansen, H. L. Chan, J. Lu, *et al*, *Chem. Phys. Lett.*, **504** 41–45 (2011).
- [8] S. Rackauskas *et al*, *Nano Lett.*, **14** 10 5810–5813 (2014).
- [9] H. Sheng *et al*, *J. Appl. Crystallogr.*, **49** 462–467 (2016).

Тиристорный токовый ключ для управления накачкой полупроводниковых лазеров

П.С. Гаврина

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

Создание компактного и энергоэффективного устройства для импульсной накачки мощных полупроводниковых лазеров с амплитудой выходного тока от единиц до сотен ампер остаётся актуальной задачей. Для генерации импульсов длительностью 1–150 нс предлагается лавинный тиристорный токовый ключ на основе структур GaAs или систем GaAs/AlGaAs/InGaAs. В работе [1] была представлена концепция лазера-тиристора, который является источником мощного лазерного излучения сам по себе. В типичной схеме параллельно тиристорному ключу расположен конденсатор, номинал которого подбирается исходя из требований к длительности импульса. Особенностью используемых тиристоров по сравнению с аналогами является низкое напряжение питания, в пределах 30 В, которого оказывается достаточно для эффективного переключения прибора с задержками на уровне от единиц наносекунд до единиц микросекунд (в зависимости от амплитуды тока управления, напряжения питания и температуры [2,3]) относительно начала управляющего импульса тока малой амплитуды. Как правило, используемая амплитуда тока управления не превышает 150 мА, что вместе с малым напряжением питания и позволяет достичь энергетической эффективности готового прибора.

Лавинные тиристоры могут быть успешно использованы для обеспечения накачки полупроводниковых лазеров. Тиристорный ключ может размещаться непосредственно на кристалл полупроводникового лазера (одиночного чипа, линейки или матрицы) либо через токопроводящий носитель. Минимальное расстояние между ключом, лазером и конденсатором позволяет снизить влияние паразитных индуктивностей. Были получены импульсы длительностью 950 нс с выходной оптической мощностью 6 Вт, увеличение длительности

импульса до 1.4 нс даёт возрастание оптической мощности до 8 Вт в случае применения конденсатора номиналом 300 пФ [4]. Также проводится работа по исследованию полупроводниковых лазеров в сборках с тиристорными токовыми ключами при длительностях импульса 10–150 нс и выходной оптической мощностью десятки ватт.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1] V. S. Yuferev *et al*, *IEEE Trans. Electron Devices*, **62**, 4091–4096, (2015).
- [2] С.О. Слипченко и др. *ФТП*, **48**, 716–718, (2014).
- [3] O.S. Soboleva *et al*, *IEEE Trans. Electron Devices* **66**, 1827–1830, (2019).
- [4] S.O. Slipchenko *et al*, *Opt. express* **27**, 31446–31455, (2019).

Исследование синтеза протопорфирина IX, индуцированного 5-аминолевулиновой кислотой, в клеточных линиях A549, HeLa и 3T3 методом конфокальной флуоресцентной микроскопии.

Д.А. Горбенко

ФТИ им. Иоффе, ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Одним из методов современной онкологии, широко используемым в клинической практике, является фотодинамическая терапия (ФДТ). Основой ее успешного использования для лечения онкологических заболеваний является эффективная генерация активных форм кислорода фотосенсибилизаторами (ФС) — веществами синтетического и природного происхождения. В настоящее время ФС активно используют для определения локализации опухоли, трофических язв и некоторых других патологий, а также для оценки их размеров и исследования морфологии [1]. В России несколько групп ФС были допущены к клиническим испытаниям, в том числе производные хлорина е6, гематопорфирин и δ -аминолевулиновая кислота (АЛК). Последняя группа ФС особенно примечательна, поскольку АЛК является предшественником эндогенно образованного ФС — протопорфирина IX (PrIX), известного также как гемин (железо (III)) [2].

В этом исследовании была проанализирована кинетика накопления PrIX индуцированного 5-АЛК в клетках линий HeLa, A549 и 3T3. Образцы культу-

вировались в чашках Петри в среде DMEM, содержащей 10% FBS и 1% пенициллина/стрептомицина в атмосфере 5% CO₂, 50% влажности, при 37 °С. Перед экспериментами клетки выдерживали в растворе, содержащем 5-АЛК в различных концентрациях, при этом происходило его проникновение внутрь клеток. Время инкубации в растворе с 5-АЛК во всех клеточных линиях также варьировалось.

В первой группе экспериментов клетки HeLa, A549 и 3T3 инкубировались в течение часа, 2, 3 и 4 часов в разных дозах: без добавления 5-АЛК, с дозой 50, 100, 200 мкг/мл. После этого клетки промывали PBS и производился мониторинг флуоресценции синтезированного в клетках PrIX на конфокальном флуоресцентном микроскопе Olympus. Флуоресценция в образцах всех клеточных линий возбуждалась излучением на длине волны 405 нм. Мощность лазера удерживалась на уровне 4%. Сигнал флуоресценции регистрировался в диапазоне длин волн от 610 до 650 нм. Впоследствии интенсивность флуоресценции PrIX, регистрируемой в клетках, анализировалась с помощью коммерческой программы ImageJ [3]. В этом эксперименте была построена временная кривая накопления PrIX в зависимости от дозы 5-АЛК. Наилучшее накопление происходило при дозе 100 мкг/мл и 3 часах инкубации в растворе 5-АЛК. При повышении концентрации 5-АЛК клетки прекращают активную фазу синтеза PrIX, интенсивность флуоресценции постепенно уменьшается. Во втором эксперименте клетки HeLa, A549 и 3T3 инкубировали в течение 3 часов в разных дозах: в отсутствие 5-ALA и при дозах 50, 75, 100, 125, 150 и 175 мкг/мл. Было обнаружено, что наилучшее накопление PrIX происходит при 100 мкг/мл 5-АЛК во всех клеточных линиях.

В этом исследовании было показано, что максимальное накопление PrIX достигается через 3 часа после добавления 5-АЛК при дозе 100 мкг/мл. Увеличение сигнала флуоресценции по сравнению с контрольными образцами составляет 43%. Кроме того, существует большое различие в характере локализации PrIX, синтезируемого в клетках линии HeLa от других типов клеток: клеточная линия HeLa более интенсивно накапливает PrIX в околядерной области, преимущественно в митохондриях, но не равномерно во всей цитоплазме.

Литература

- [1] H. Abrahamse, *Biochem J.*, **473** (4), doi: 10.1042/BJ20150942, 347–364, (2016).
- [2] W. Yang, *Photodiagnosis Photodyn. Ther.*, **2:101589**, doi: 10.1016/j.pdpdt.2019.101589 (2019)

Напряжения несоответствия от дилатационных включений в полупроводниковых наногетероструктурах с угловыми границами

Ж.В. Гудкина

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

Развитие технологии полупроводниковых приборных наногетероструктур сложной архитектуры требует исследования полей упругих деформаций и напряжений, обусловленных различиями в кристаллических решетках и коэффициентах теплового расширения материалов, составляющих эти наногетероструктуры. Напряжения несоответствия и остаточные термоупругие напряжения вызывают изменения физических и служебных характеристик соответствующих приборных наногетероструктур, а релаксация этих напряжений сопровождается образованием различных дефектов, в частности, дислокаций несоответствия, также приводящих к деградации свойств и сокращению срока службы приборов. Определение критических условий появления таких дефектных структур и разработка теоретических моделей их образования формируют одно из ключевых направлений фундаментальных исследований, необходимых для развития современных полупроводниковых нанотехнологий.

Важным начальным этапом в разработке подобных теоретических моделей является постановка соответствующих граничных задач теории упругости, решение которых позволяет исследовать особенности полей напряжений несоответствия на стадии, предшествующей их релаксации. В частности, одной из таких задач является поиск упругих полей от дилатационных включений разной формы в упругом теле с угловой границей, которую можно рассматривать как клиновидный выступ или вырез с произвольным углом раствора. Элементарным включением в этом случае может служить бесконечно тонкая дилатационная нить, обладающая собственной трехмерной дилатацией. Имея решение для такой нити, можно простым интегрированием получать аналогичные решения для длинных включений с поперечным сечением произвольной формы.

В настоящей работе методом виртуальных поверхностных дислокаций (ВПД) найдено решение задачи для дилатационной нити в упругом теле с угловой границей. Этим методом в прошлом решались подобные задачи для краевых [1,2] и винтовых [3] дислокаций. Искомое поле напряжений искалось в виде: $\sigma = \sigma^\infty + \sigma^v$, где σ^∞ известное поле напряжений дилатационной нити в бесконечной упругой среде [4], а σ^v — дополнительное поле напряжений

ВПД, обеспечивающее выполнение граничных условий на угловой границе тела. В такой постановке задача сводится к отысканию четырех функций распределения ВПД из граничных условий, которые дают систему четырех интегральных уравнений. Интегральным преобразованием Меллина эта система сводится к системе алгебраических уравнений для определения образов Меллина функций распределения ВПД. В результате дополнительное поле σ^v получается в интегральном виде — в форме обратного преобразования Лапласа–Меллина от произведений известных образов Меллина напряжений отдельных ВПД и найденных образов Меллина функций распределения ВПД. Анализ полученного решения проводился численно с использованием карт напряжений дилатационной нити.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (грант № 19-29-12041). Автор благодарит научного руководителя Гуткина М.Ю. за помощь и консультации при выполнении работы.

Литература

- [1] M. Hecker, A.E. Romanov, *Phys. Stat. Sol. A* **130** 91–101 (1992).
- [2] M. Hecker, A.E. Romanov, *Mater. Sci. Eng. A* **164** 411–414 (1993).
- [3] M.Yu. Gutkin, A.E. Romanov, E.C. Aifantis, *Phys. Stat. Sol. A* **153** 411–414 (1996).
- [4] А.Л. Колесникова, Р.М. Сорока, А.Е. Романов, *Mater. Phys. Mech.* **13** 71–91 (2013).

Исследование влияния безызлучательной рекомбинации в полупроводниковых меза-структурах различной квантовой размерности в структурах на основе GaAs

А.С. Драгунова

СПбАУ им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

В научном мире все больший интерес вызывает разработка и создание миниатюрных оптоэлектронных полупроводниковых приборов, таких как источники одиночных фотонов, миниатюрные источники излучения, детекторы и компактные сенсоры на основе материалов АЗВ5. Изготовление таких приборов, как правило, требует травления эпитаксиальных слоев сквозь активную область. Это может привести к существенному влиянию безызлучательной рекомбинации на боковых поверхностях и сказаться на характеристиках прибора. В качестве активной области для таких приборов чаще всего используются системы материалов на основе InP и GaAs. При этом для приборов с

активной областью на основе GaAs характерна более высокая температурная стабильность, однако вклад безызлучательной рекомбинации на травленной поверхности в таких структурах на порядок больше, чем в структурах на основе InP. Эффект безызлучательной рекомбинации носителей в мезаструктурах с InAs/InGaAs/GaAs квантовыми точками (КТ) уже был подробно рассмотрен в работе [1], и было показано, что из-за сильной локализации носителей в данных КТ влияние безызлучательной рекомбинации на поверхность мезы незначительно. Использование массивов КТ в качестве активной области для лазеров позволяет достичь очень малых размеров и высоких рабочих температур, однако структурам на основе InAs/InGaAs/GaAs КТ присуще насыщение усиления, что стимулирует исследователей использовать структуры на основе InGaAs/GaAs квантовых ям (КЯ) и InGaAs/GaAs квантовых яма-точек (КЯТ) [2].

В данной работе было выполнено исследование фотолюминесценции (ФЛ) полупроводниковых меза-структур различных диаметров 0.35–10 мкм и различной квантовой размерности в системе материалов на основе GaAs в диапазоне температур 78–290 К и при различных мощностях оптической накачки. Так же была разработана теоретическая модель, позволяющая описать полученные экспериментальные зависимости при помощи уравнений диффузии носителей заряда и уравнения баланса для каждого типа активных областей. Сопоставление данных моделирования и эксперимента позволило оценить коэффициенты диффузии для структур с КЯ, КЯТ и КТ. Получено, что в случае InAs/InGaAs/GaAs КТ травление боковых стенок оказывает незначительное влияние на интегральную интенсивность ФЛ структуры вплоть до диаметра мезы 0.35 мкм. Это объясняется глубокой трехмерной локализацией носителей заряда в КТ, что в свою очередь приводит к значительному уменьшению диффузионной длины по сравнению с квантовыми ямами. В случае InGaAs/GaAs КЯТ травление боковых стенок приводит к гашению ФЛ при комнатной температуре уже в мезах диаметром 1 мкм. Негативный эффект безызлучательной рекомбинации усиливается с увеличением температуры. Хотя InGaAs/GaAs квантовые яма-точки обеспечивают трехмерную локализацию носителей, небольшая энергия локализации носителей в точках приводит к термическому выбросу носителей в матрицу и их дальнейшей безызлучательной рекомбинации на боковых стенках мез. Свободная диффузия носителей заряда вдоль плоскости InGaAs/GaAs КЯ дает им возможность достигать боковых стенок и рекомбинировать там без излучения во всем исследованном диапазоне температур 78–290 К. Минимальный диаметр мез, в которых была получена фотолюминесценция при комнатной температуре, в случае КЯ составил 8 мкм.

Полученные результаты исследования безызлучательной рекомбинации на боковых стенках травления могут быть использованы при создании различных оптоэлектронных приборов, если их характерный размер составляет единицы мкм. Реализация эффективных микролазеров и микроустройств на основе InGaAs/GaAs КЯ или КЯТ требует подавления безызлучательной рекомбинации на боковых стенках при помощи поверхностной пассивации.

Литература

- [1] M.V. Maximov, D.A. Bedarev, С.М. Sotomayor Torres, *et al*, *Proc. 26th ICPS*, IOP Publishing Conf. Ser. **171** 10 (2003).
- [2] E. Moiseev, N. Kryzhanovskay, M. Maximov, *et al*, *Opt. Lett.* **43** (19) 4554–4557 (2018).

Методика создания гетероструктур из монослоев диалъкогенидов переходных металлов рекордных размеров и их оптические свойства

Т.В. Иванова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

На сегодняшний день одной из самых быстроразвивающихся областей физики твердого тела являются двумерные материалы, такие как графен и диалъкогениды переходных металлов (ДПМ). Объемные кристаллы последних являются полупроводниками с непрямой запрещенной зоной, а отдельные молекулярные слои — прямозонными полупроводниками, что экспериментально наблюдается в виде многократного увеличения интенсивности фотолюминесценции при уменьшении толщины образца. Кроме этого, уникальным оптическим свойством монослоев ДПМ является малая ширина линии фотолюминесценции (несколько мэВ), связанная с формированием экситонных резонансов, наблюдаемых вплоть до комнатной температуры [1]. На сегодня монослои ДПМ наилучшего качества получают методом механического расщепления, а их комбинирование с другими двумерными материалами позволяет создавать ван-дер-ваальсовы (ВДВ) гетероструктуры [2].

В настоящем исследовании мы демонстрируем: способ получения монослоев ДПМ рекордных размеров (Рис. 1а), метод создания ВДВ гетероструктур, состоящих из монослоя ДПМ, инкапсулированного тонкими слоями диэлектрика нитрида бора (Рис. 1б). Такой подход позволяет защищать ДПМ от нежелательного допирования и наблюдать экситонные линии шириной 1.8 мэВ (Рис. 1с), близкой к величине чисто однородного уширения в

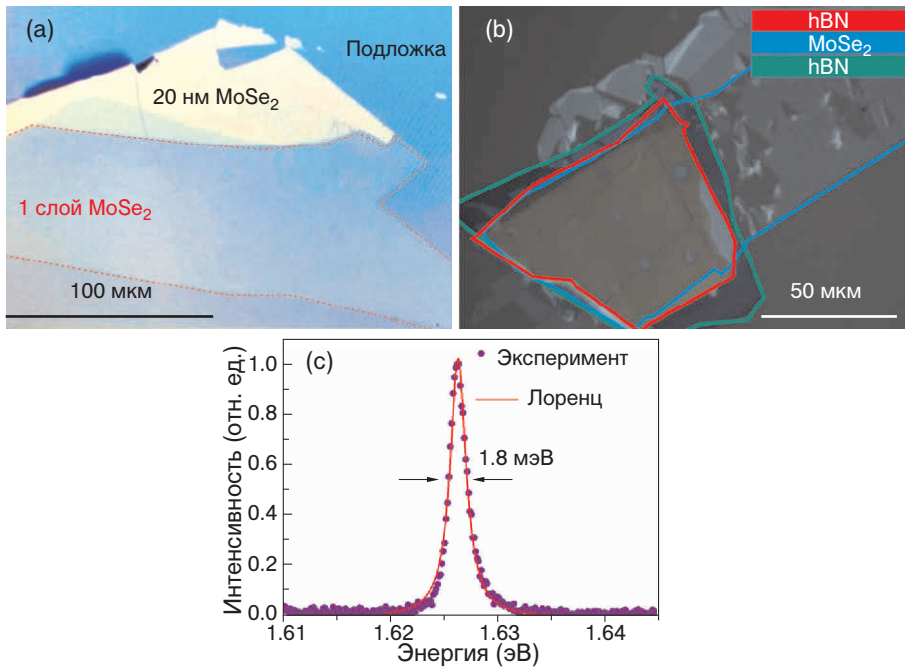


Рис. 1. (a) Оптическая микрофотография монослоя диселенида молибдена на полимере, (b) оптическая микрофотография монослоя диселенида молибдена, инкапсулированного тонкими слоями диэлектрика гексагонального нитрида бора, (c) спектр фотолюминесценции гетероструктуры на панели (b), снятый при 7 К

1.7 мэВ [3], характерного для образцов с нулевым беспорядком.

Автор выражает благодарность своим коллегам за их вклад в эту работу: Khestanova Ekaterina, Ivan Iorsh, Vasily Kravtsov, Fedor Benimetskiy.

Литература

- [1] K.F. Mak, *et al.*, PRL **105**, 136805 (2010).
- [2] A.K. Geim and I.V. Grigorieva *Nature* **499**, 419-425 (2013).
- [3] O.A. Ajayi, *et al.*, *2D Materials* **4**, 3 (2017).

Влияние Оже-рекомбинации с участием глубоких центров на квантовую эффективность светодиодов InGaN/GaN видимого диапазона

А.А. Карпова

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

Светодиоды (СД) видимого диапазона InGaN/GaN находят широчайшее применение в современной науке и технике: от декоративной подсветки и управления состоянием человека посредством подавления выработки мелатонина до реализации технологии связи Li-Fi (Light Fidelity). Однако потенциальные возможности структур InGaN/GaN ограничены двумя проблемами: отсутствием эффективных излучателей в зеленой области видимого спектра, а также общей для структур InGaN/GaN нетривиальной зависимостью внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) от уровня инжекции. Установлено, что максимальное значение ВКЭ СД InGaN/GaN достигается в области малых плотностей тока накачки, после чего наблюдается весьма резкий спад ВКЭ при достижении плотностей тока накачки порядка единиц–десятков A/cm^2 .

Известно, что структуры InGaN/GaN являются высокодефектными вследствие значительного рассогласования постоянных решеток и коэффициентов термического расширения материалов активной области и подложки [1]. Это позволяет утверждать, что в СД InGaN/GaN возможен дополнительный эффективный канал безызлучательной рекомбинации Оже-типа. Таким процессом является Оже-рекомбинация (ОР) с участием глубоких центров. Существенное влияние примесной ОР на работу СД InGaN с КЯ было установлено экспериментально в работе [2]. Известно, что данный механизм хорошо изучен теоретически в объемном материале [3,4], однако на сегодняшний день микроскопическая модель ОР с участием глубоких центров в КЯ отсутствует.

В данной работе рассмотрена из первых принципов Оже-рекомбинация с участием глубоких центров в структуре с квантовыми ямами InGaN/GaN. Исследованы возможные каналы как с участием локализованных носителей заряда, так и носителей заряда в барьерной области и выделены наиболее эффективные из них. Для описания энергетического спектра и волновых функций носителей заряда использована четырехзонная модель Кейна [5]. Скорость и коэффициент Оже-процесса рассчитаны в рамках первого порядка теории возмущений по электрон-электронному взаимодействию. Для опре-

деления внутренней квантовой эффективности использована ABC-модель [6]. Численные расчеты проведены для СД InGaN/GaN, излучающих в синей и зеленой областях видимого спектрального диапазона [7].

Показано, что Оже-рекомбинация с участием глубоких центров и локализованных носителей заряда оказывает значительное влияние на максимальное значение ВКЭ светоизлучающей структуры. Спад внутренней квантовой эффективности в режиме высоких уровней инжекции определяется одновременно тремя процессами Оже-типа: межзонной Оже-рекомбинацией, Оже-рекомбинацией с участием глубоких центров и локализованных носителей заряда, а также Оже-рекомбинацией с участием глубоких центров и носителей заряда в барьерной области светодиодной структуры.

Автор благодарит Д.М. Самосвата и Г.Г. Зегрю за помощь, оказанную на каждом этапе исследования. тельная просьба - не увлекаться количеством

Литература

- [1] J.M. Phillips, *et al*, *Laser Photonics Rev.* **1**, 307 (2007).
- [2] A. David, *et al*, *Phys. Rev. Appl.* **11**, 031001 (2019).
- [3] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясневич, *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках*. С.-Петербург: Изд-во «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН», 376 с. (1997).
- [4] A. Hangleiter, *Phys. Rev. B* **37**, 2594 (1988).
- [5] E.O. Kane, *J. Phys. Chem. Solids* **1**, 82 (1956).
- [6] S. Karpov, *Opt. Quant. Electron.* **47**, 1293 (2015).
- [7] A.M. Armstrong, M.H. Crawford, D.D. Koleske, *Appl. Phys. Express* **7**, 032101 (2014).

Оптические свойства и структурные особенности массивов полифазных нитевидных нанокристаллов GaP_{1-x}N_x/GaP

О.Ю. Коваль

СПбАУ, Санкт-Петербург, Россия

III–V полупроводниковые нитевидные нанокристаллы являются перспективным материалом для создания приборов оптоэлектроники нового поколения, таких как: солнечные элементы, светоизлучающие приборы, лазеры или фотодетекторы. Одномерная нитевидная морфология подобных наноструктур

имеет ряд преимуществ перед объёмными материалами, а именно: благодаря большому аспектному соотношению и развитой поверхности эффективно релаксируют упругие напряжения кристаллической решётки; расширяется область смешиваемости твердых растворов; становится возможной стабилизация метастабильных полиморфных модификаций; проявляются волноводные свойства и оптические резонансы, что позволяет увеличить как поглощение, так и эмиссию света [1]. В настоящий момент остаётся нерешенной проблема создания устройств, работающих в видимом спектральном диапазоне. Самым перспективным материалом для создания подобных фотовольтаических приборов выступает GaP с шириной запрещенной зоны в 2.26 эВ (300 К) [2].

Однако, фосфид галлия является непрямозонным полупроводниковым материалом, что затрудняет использование этого материала. Для преодоления этого недостатка используют азотсодержащие твердые растворы типа $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$. Внедрение даже в небольших концентрациях $\geq 0.6\%$ атомов азота в матрицу GaP значительно влияет на электронную структуру и приводит к перестроению к прямой электронной зоне. В данной работе методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ-ПА) на подложках Si (111) были выращены массивы самокаталитических гетероструктурированных нитевидных нанокристаллов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaP}$. Для исследования влияния встраивания азота, при тех же ростовых условиях был синтезирован эталонный образец — массив нитевидных нанокристаллов GaP (без добавления азота). В условиях комнатной температуры (300 К) методом фотолюминесцентной микроспектроскопии были изучены оптические свойства массивов нитевидных нанокристаллов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaP}$. Было показано, что при внедрении атомов азота появляются широкие полосы излучения в районе ~ 600 нм, что согласуется с ВАС-моделью и соответствует $\sim 0.3\%$ концентрации примесного азота [3], чего не наблюдалось в образце, не содержащем примесного азота.

Особенности колебательных спектров были исследованы с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния света, на которых наблюдалось появление дополнительной колебательной моды кроме основных, относящихся к модам как кубического так и гексагонального фосфида галлия [5]. Изображения просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения показали существование микро-двойников кубического GaP ($F43m$) и метастабильной кристаллической вюрцитной фазы ($P6_3mc$) как для азотсодержащих образцов, так и для эталонного образца. Существование метастабильной вюрцитной фазы также доказывается методом рентгеновской дифракции. Концентрация вюрцитной фазы по всему массиву ННК была рассчитана с помощью метода Ритвелда и достигала $> 10\%$ [5].

Литература

- [1] X. Lu, X. Gao, C. Li, *et al*, *Phys. Let. A* **381** (35) 2986–2992 (2017).
- [2] Y. Lan, *et al*, *Micromachines*. **7** (9), 121 (2016).
- [3] I.A. Buyanova, G. Pozina, J.P. Bergman, *et al*, *App. Phys. Let. A* **81**, 52 (2002).
- [4] I. Zardo, S. Conesa-Boj, F. Peiro, *et al*, *Phys. Rev. B*, **80**, 245324 (2009)
- [5] H.M. Rietveld, *Acta Crystallographica* **22** 151–152 (1967).

Оптические силы вблизи одномерного фотонного кристалла

Н.А. Костина

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Взаимодействие света с мезоразмерными частицами может обеспечивать стабильный захват частиц, их перемещение и создание упорядоченных массивов [1,2]. Управление положением микро- и нанообъектов при помощи света нашло множество применений, таких как создание наноструктур, сортировка частиц для биомедицинских приложений, а также в микроэлектронике. Однако, для такого манипулирования часто требуются источники излучения с высокой мощностью [3], что не подходит для биологических исследований, кроме того, расстояния между частицами зависят от длины волны излучения и ограничены дифракционным пределом.

В случае оптического манипулирования частицами вблизи подложек, для которых возможно распространение поверхностных или объемных мод, раскрывается сразу ряд преимуществ: увеличение жесткости оптической ловушки без увеличения интенсивности излучения [4,5], получение расстояний между несколькими взаимодействующими частицами меньше дифракционного предела падающего излучения [4,6], т.н. «лучи притяжения» к источнику излучения в поперечной плоскости [7]. Эти эффекты наблюдались ранее для плазмонных поверхностей и поверхностей из метаматериала.

В данной работе рассмотрены оптические силы, действующие на частицы вблизи одномерного фотонного кристалла. Возбуждение объемных и поверхностных мод происходит за счет ближних полей частицы и не требует дополнительных механизмов. Таким образом, на границах кристалла образуются области высокой интенсивности, которые формируют положения устойчивого равновесия для нескольких взаимодействующих частиц, что позволяет уменьшать расстояние между ними. В случае одиночной частицы, может быть получено как усиление захвата в гауссовом пучке, так и получение «силы при-

тяжения» для наклонного падения плоской волны. Ранее схожий случай был рассмотрен в работе [8], однако взаимодействие несокльких частиц, а также падение плоской волны в системе не описывалось.

Для описания излучения дипольных частиц вблизи границы раздела сред применялось спектральное угловое разложение функции Грина [9], а вклад различных типов мод структуры оценивался исходя из дисперсионной характеристики материала.

Было установлено, что моды одномерного фотонного кристалла обеспечивают стабильный захват частиц на его поверхности, позволяют прецизионно контролировать положения частиц и размещать их на расстояниях значительно меньших дифракционного предела. Кроме того, были получены зависимости оптических сил, действующих вблизи фотонного кристалла на один или несколько нанообъектов, от параметров кристалла и найдены оптимальные значения последних.

Литература

- [1] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, *et al*, *Opt. Lett.* **11** (5) 288–290 (1986).
- [2] K. Dholakia, P. Zemanek, *Rev. Mod. Phys.* **82** 1767 (2010).
- [3] L. Novotny, R.X. Bian, X.S. Xie, *Phys. Rev. Lett.* **79** (4) 645 (1997).
- [4] N. Kostina, A. Ivinskaya, S. Sukhov, *et al*, *Phys. Rev. B* **99** (12) 125416 (2019).
- [5] A. Ivinskaya, M.I. Petrov, A.A. Bogdanov, *et al*, *Light Sci. Appl.* **6** (5) e16258 (2017).
- [6] N.A. Kostina, D.A. Kislov, A.N. Ivinskaya, *et al*, arXiv preprint arXiv:1909.10265 (2019).
- [7] M.I. Petrov, S.V. Sukhov, A.A. Bogdanov, *et al*, *Laser Photonics Rev.* **10** (1) 116–122 (2016).
- [8] D.A. Shilkin, E.V. Lyubin, I.V. Soboleva, *et al*, *J. Opt. Soc. Am.* **33** (6) 1120–1127 (2016).
- [9] L. Novotny, B. Hecht, *Principles of nano-optics*, Cambridge university press, (2012).

Сенсибилизация люминесценции боросиликатных стекол, активированных редкоземельными ионами, при облучении электронным пучком

В.А. Кравец

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

В настоящее время идет поиск эффективных сцинтилляторов, излучающих в видимом оптическом диапазоне. Активно ведутся работы по разработке аморфных сцинтилляторов на основе оксидных стекол, так как стекла легче синтезировать и придавать им нужную форму, по сравнению с кристаллическими матрицами. Однако стекла характеризуются относительно низким по

сравнению с кристаллическими материалами выходом люминесценции. Одним из способов повышения выхода люминесценции активатора является облучение матриц, активированных редкоземельными ионами (РЗИ), высокоэнергичными частицами [1,2]. При облучении электронным пучком в образцах происходят динамические процессы, которые могут приводить как к обратимым (захват электронов глубокими уровнями), так и к необратимым (формирование и отжиг дефектов) изменениям в твердом теле. Данные процессы могут приводить к существенному изменению выхода люминесценции в зависимости от условий облучения.

К таковому относится форма кристалла, температурное поле, а также вызываемые его неоднородностью упругие напряжения. Последние, в свою очередь, достигая достаточно высоких значений, способны повлечь возникновение или размножение различных дефектов кристаллической решетки. Большое же количество дефектов может влиять на внутренние поля достаточно сильно, чтобы это требовало учета. В частности, значительное количество дислокаций может создать пластическую деформацию, и вообще существенно изменить внутреннюю структуру кристалла, в результате чего свойства его могут существенно отличаться от предполагаемых.

Целью работы является исследование процессов модификации электронным пучком боросиликатных стекол, активированных РЗИ, и исследование причины увеличения выхода люминесценции в боросиликатных стеклах.

В качестве образцов были выбраны две системы боросиликатного стекла с различным составом. Во-первых, была выбрана известная оксидная система, близкая к SON 68 [3]. Стекла SON 68 являются химически и термически стойкими и по своим характеристикам считаются пригодным для иммобилизации ядерных отходов [3,4]. В качестве второй системы было синтезировано новое многокомпонентное боросиликатное стекло с висмутом. Такая система была выбрана, поскольку тяжёлые висмутовые стекла обладают большой плотностью и коэффициентом преломления, что делает их перспективной матрицей для активирования редкоземельными ионами [5].

В качестве РЗ активатора в стеклах был выбран трехвалентный европий, обладающий интенсивной люминесценцией в красном оптическом диапазоне. Также Eu можно использовать в качестве люминесцентного зонда, спектр которого крайне чувствителен к структурным изменениям легированного материала [6]. Была исследована однородность состава и люминесцентных свойств образцов, получены концентрационные зависимости интенсивности люминесценции от содержания активатора.

Для подбора оптимальных условий боросиликатные стекла были модифицированы электронным пучком с различной плотностью мощности. Прове-

монстрировано, что возможно как увеличение выхода люминесценции стекол, так и уменьшение в зависимости от плотности мощности и времени облучения. Была оценена температура нагрева образцов при различной плотности облучения электронным пучком. Показано, что процессы являются радиационностимулированными. При облучении образца электронным пучком с высокой плотностью мощности наблюдается изменение рельефа поверхности и состава. В работе было определено изменение эффективности захвата возбуждения активаторами до и после облучения электронным пучком по методике предложенной в [7], предложена модель сенсбилизации активаторов точечными дефектами.

Автор выражает благодарность Старухину А.Н. за помощь в получении спектров ФЛ, Поповой Т.Б. за исследование образцов методом РСМА, Нащекину А.М. за исследование образцов методом РЭМ. Особая благодарность выражается научному руководителю Ивановой Е.В. за всестороннюю помощь в исследовательской работе. Работа выполнена при поддержке РФФИ 19-32-90021.

Литература

- [1] K.N. Orekhova, R. Tomala, D. Hreniak, *et al*, *Opt. Mater.*, **74**, 170–175 (2016).
- [2] A. K. Bedyal, *et al*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **351**, 27–34 (2015).
- [3] M.I. Iojoyan, & W.E. Lee, *Metall. Mater. Trans.*, 837–851 (2010).
- [4] M. Mohapatra and B.S. Tomar, *Defect and Diffusion Forum*, **341**, 107–128, (2013)
- [5] Егорышева А.В., Володин В.Д., Скориков В.М. и др., *Неорганические материалы*. **46** 4 495–500 (2010).
- [6] V.A. Kravets *et al*, *Opt. Spectrosc.*, **125**, 2, 188 (2018)
- [7] M.V. Zamoryanskaya, A.N. Trofimov *Opt. Spectrosc.*, **115**, 1 79–85 (2013).

Сверхбыстрое лазерно-индуцированное размагничивание в тонких пленках галфенола

Д.В. Кунту

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

В настоящее время ведется поиск новых и усовершенствованных подходов к управлению намагниченностью на сверхкоротких временных и сверхмалых пространственных масштабах. Воздействие фемтосекундными лазерными импульсами позволяет изменять магнитное состояние материалов и наноструктур на пико- и даже суб-пикосекундных временах [1]. Так, воздействие короткого лазерного импульса на магнитный металл приводит к размагничиванию,

происходящему быстрее, чем за 100 фс [2]. Однако, особенности отклика магнитных металлов на лазерное возбуждение до сих пор не полностью поняты и не предложено строгих физических моделей таких процессов. Таким образом, изучение сверхбыстрой динамики в тонких слоях магнитных металлов является актуальной экспериментальной и теоретической задачей.

Целью данной работы было установление факторов влияющих на сверхбыстрое размагничивание в тонких пленках ферромагнитного металла галфенола $\text{Fe}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}$ (FeGa). Для этого было исследовано экспериментально влияние на этот процесс толщины пленки и характера ее интерфейса с подложкой. В измерениях использовались образцы с толщиной слоя FeGa от 5 до 100 нм, выращенные методом магнетронного распыления на подложке GaAs, а также многослойные образцы FeGa/Cu/GaAs и FeGa/Cu/FeGa/GaAs. Измерения проводились по методике фемтосекундной магнитооптической накачки-зондирования (рис. 1). Для возбуждения динамики намагниченности использовались лазерные импульсы накачки длительностью 19 фс, длиной волны 1030 нм и плотностью энергии в импульсе от 2 до 14 мДж/см². Детектирование изменений ΔM_s величины намагниченности M_s производилось путем измерения меридионального магнитооптического эффекта Керра для отраженного импульса зондирования (190 фс, 515 нм, 0,4 мДж/см²) в зависимости от времени задержки между импульсами накачки и зондирования.

На рис. 1 показано сверхбыстрое размагничивание в пленке FeGa толщиной 50 нм на подложке GaAs. Как видно из рисунка, после воздействия лазерного импульса намагниченность уменьшается за время менее 1 пс на величину, достигающую 6% при плотности энергии возбуждающего импульса 14 мДж/см². Релаксация к исходному значению происходит на существенно больших временах. Величина размагничивания увеличивается линейно при увеличении плотности энергии лазерного импульса накачки. Такое поведение характерно для переходных металлов. Однако в пленке FeGa толщиной 7 нм наблюдалась качественно иная динамика намагниченности, в частности размагничивание происходило в два этапа, и максимальное размагничивание происходило на временах около 10 пс после воздействия импульса. Мы связываем изменение характера размагничивания с существенным влиянием интерфейса FeGa/GaAs. Ранее было показано, что такой интерфейс модифицирует равновесную динамику намагниченности [3]. Наши результаты указывают на то, что неравновесная динамика также чувствительна к наличию данного интерфейса.

Автор благодарит A.W. Rushforth за предоставленные образцы, А.М. Калашникову за научное руководство, Я.А. Могунова и Л.А. Шелухина за помощь в экспериментах. Работа выполнена частично при поддержке гранта

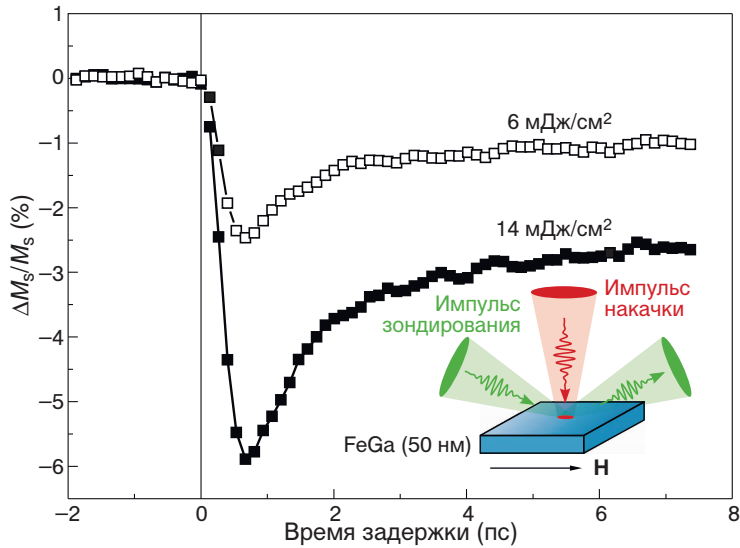


Рис. 1. Лазерно-индуцированное относительное изменение намагниченности $\Delta M_s / M_s$ пленки FeGa (50 нм) как функция времени задержки между импульсами накачки и зондирования, измеренное при различных плотностях энергии в импульсе накачки. Вставка: схема эксперимента по методике накачки-зондирования. Внешнее магнитное поле приложено в плоскости образца. Измерения проводились при комнатной температуре

РФФИ 20-32-70149.

Литература

- [1] A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2731 (2010).
- [2] E. Beaurepaire *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4250 (1996).
- [3] L. Chen *et al*, *Nature Phys.* **14**, 490 (2018).

Суперрезонансные состояния в кремниевых метаповерхностях

А.А. Кутузова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Связанные состояния в континууме (bound states in the continuum, ССК) представляют собой волны, остающиеся локализованными, даже если они со-

существуют с состояниями в непрерывном спектре, которые соответствуют распространяющимся волнам, уносящим энергию [1]. Само существование ССК не поддается интуитивным представлениям. Исторически ССК были впервые предложены в квантовой механике. Поскольку эти состояния являются общим волновым явлением, позже они были идентифицированы в электромагнитных волнах, акустических волнах в воздухе, волнах на поверхности жидкости и упругих волнах в твердых телах. Строго математически ССК не существуют в конечных структурах, однако их можно наблюдать в виде высокодобротных резонансов, так называемых суперрезонансных состояний [2]. Для достижения высокой добротности суперрезонансных мод необходима настройка параметров системы для приближения к условиям возникновения ССК.

На первом этапе мы детально рассмотрели кремниевую метаповерхность, состоящую из параллельных цилиндров. Согласно литературным данным, такие системы могут поддерживать множественные ССК [3]. Электромагнитная задача для набора диэлектрических цилиндров имеет аналитическое решение. Затем рассматривалась аналогичная структура из прямоугольных кремниевых наноблоков на кварцевой подложке [4], так же поддерживающая ССК, которую, в свою очередь, легче изготавливать технологически. В изучаемых нами структурах соседние элементы группируются попарно и составляют единую цепочку димеров, на которую падает плоская волна по нормали к поверхности. Для каждой из структур анализируются спектры пропускания, на которых наблюдаются резонансы. Добротность этих резонансов исследуется при варьировании геометрических параметров. Основной задачей данной работы является определение всех суперрезонансных мод в низкочастотном интервале электромагнитного спектра и изучение их свойств с помощью варьирования параметров заданных структур.

Метод многократного рассеяния позволяет найти точное решение задачи о распространении электромагнитного поля в изучаемых системах. Мы анализировали узкие резонансные особенности в спектрах пропускания для случая нормального падения. После того, как были найдены резонансные состояния в системах, посчитаны пики в узком диапазоне частот, определены моды электромагнитных волн по распределению поля в максимуме соответствующего пика, определялись добротности данных состояний в зависимости от параметров системы (параметр h задает смещение спаренных цилиндров или блоков по направлению друг к другу вдоль оси x ; другой параметр b задает смещение по нормали вдоль оси y , так что цепочки принимают зигзагообразный вид; число цилиндров N ; угол падения волны относительно вертикального направления θ). Добротность резонансных состояний, которым соответствуют

асимметричные линии в спектрах пропускания, извлекалась при помощи аппроксимации пиков формулой Фано. Далее мы определяли условия (параметры), соответствующие ССК, при которых добротность достигает максимального значения. Аналогичные вычисления были проведены методом связанных Фурье-мод (rigorous coupled-wave analysis) для кремниевых метаповерхностей из прямоугольных наноблоков.

В результате, структуру кремниевых элементов можно оптимизировать таким образом, что метаповерхность будет наиболее точно удовлетворять условию, требуемому для появления ССК с заданными свойствами. В последнее время было продемонстрировано много применений диэлектрических метаповерхностей, поддерживающих суперрезонансные состояния. Низкопороговые лазеры, обратная связь которых обусловлена модами ССК, открывают новые возможности для изучения взаимодействия света и вещества [5]. Многопиксельные сенсоры, состоящие из отдельных метаповерхностей, поддерживающих ССК, рабочие частоты которых заполняют некоторый диапазон, позволяют быстро и эффективно определять концентрацию и состав протеинов в образцах биологических материалов [6, 7]. Модуляторы на основе метаповерхностей, состоящих из кремниевых блоков, обеспечивают управление терагерцовым излучением благодаря быстрому оптическому переключению добротности суперрезонансной моды [8]. Поэтому детальное определение свойств суперрезонансных мод в простой кремниевой структуре имеет большой потенциал для применения в современных технологиях.

Я благодарна М.В. Рыбину и М.Ф. Лимонову за консультации, помощь и поддержку при выполнении работы.

Литература

- [1] C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, *et al*, *Nature Rev. Mater.* **1** 16048 (2016).
- [2] M. Rybin, Y. Kivshar, *Nature* **541** 164 (2017).
- [3] E.N. Bulgakov, A.F. Sadreev, *Phys. Rev. A* **90** 053801 (2014).
- [4] Z.F. Sadrieva, I.S. Sinev, K.L. Koshelev, *et al*, *ACS Photon.* **4** 723–727 (2017).
- [5] A. Kodigala, T. Lepetit, O. Gu, *et al*, *Nature* **541** 196 (2017).
- [6] A. Tittl, A. Leitis, M. Liu, *et al*, *Science* **360** 1105–1109 (2018).
- [7] F. Yesilkoy, E.R. Arvelo, Y. Jahani, *et al*, *Nature Photon.* **13** 30 (2019).
- [8] S. Han, L. Cong, Y.K. Srivastava, *et al*, *Adv. Mater.* **31** 1901921 (2019).

Квазикристаллическая структура в режиме метаматериала

Е.Э. Маслова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В фотонной структуре режим метаматериала появляется тогда, когда локальные резонансы на структурных элементах оказываются ниже по частоте, чем брэгговская дифракция [1]. При этом, чем меньше частота брэгговской дифракции, тем сложнее получить режим метаматериала. Свойства метаматериалов обусловлены локальными резонансами Ми на структурных элементах, при этом появляется возможность определения резонансных эффективных параметров: магнитной и диэлектрической проницаемостей, которые могут иметь разные значения, в том числе близкие к нулю [2,3], что приводит к появлению однородной моды. В фотонном кристалле тоже есть состояния с почти нулевыми материальными параметрами благодаря случайному подавлению пространственной дисперсии [4]. Однако однородное распределение поля не связано с периодической структурой. Так, в работе [5] было показано, что в квазикристаллической структуре тоже может наблюдаться однородная мода благодаря случайному подавлению пространственной дисперсии. На данный момент в фотонике активно изучаются структуры с квазикристаллической решёткой [6,7], и наша работа направлена на поиск режима метаматериала в таких структурах.

В данной работе была рассмотрена квазикристаллическая структура на основе мозаики Пенроуза. Мозаика Пенроуза строилась методом проецирования пятимерной гиперкубической решётки на двумерное физическое пространство и трёхмерное пространство проекций. Структура состоит из диэлектрических цилиндров, которые были помещены в вершины ромбов, образующих мозаику Пенроуза (радиус цилиндров r , диэлектрическая проницаемость ε). Мозаика Пенроуза имеет множество конфигураций, которые зависят от параметра сдвига s при построении мозаики методом проецирования. Здесь мы рассмотрим три значения параметра s : $s = 0$, $s = 0.2$, $s = 0.5$.

Для анализа частот брэгговской дифракции вычислялся структурный фактор квазикристалла на основе решётки Пенроуза ($s = 0$) и сравнивался со структурным фактором для треугольной и квадратной решёток. Полученные результаты показывают, что в периодической структуре дифракционные мак-

симумы расположены на достаточном удалении друг от друга, в то время как в квазикристаллической структуре в том же масштабе наблюдается сгущение максимумов. Особенно важным является расстояние от волнового вектора $\mathbf{k} = 0$ до ближайшего максимума, который определяет минимальную частоту брэгговской дифракции. Близкое расположение дифракционных пиков к точке $\mathbf{k} = 0$ говорит о том, что метаматериал с квазикристаллической структурой не должен существовать.

Были исследованы спектры пропускания периодической и квазикристаллической структур. Оказалось, что в квазикристалле затухание происходит по степенному закону, а не по экспоненциальному, как в периодической. Полученные результаты говорят о том, что в квазикристалле транспортные свойства не такие, как в периодической структуре, поэтому в данном случае привычные выводы не применимы. Следовательно, наличие низких частот брэгговских резонансов не обязательно приводит к тому, что в квазикристаллической структуре не может появляться режим метаматериала.

Мы изучили распределения полей при падении гауссова пучка на квазикристаллические структуры квадратной формы. Результаты показывают, что в образцах наблюдается однородная мода, которая подтверждает переход квазикристаллической структуры в режим метаматериала. С увеличением параметра s однородная мода появляется при большем значении диэлектрической проницаемости. В структуре с параметром $s = 0.2$, $s = 0.5$ до появления режима метаматериала наблюдается промежуточное состояние с доменами, соответствующими противоположным фазам однородной моды.

Таким образом, мы показали, что в квазикристалле транспортный режим не такой, как в периодической структуре, поэтому близкое расположение дифракционных максимумов не запрещает существование режима метаматериала. Появление однородной моды подтверждает переход квазикристаллической структуры в режим метаматериала.

Автор благодарит М.В. Рыбина и М.Ф. Лимонова за консультации и помощь при выполнении работы.

Литература

- [1] M.V. Rybin *et al*, *Nature Comm.* **6** 10102 (2015).
- [2] E.E. Maslova, M.F. Limonov and M.V. Rybin, *Opt. Lett.* **43** 5516 (2018).
- [3] E.E. Maslova, M.F. Limonov and M.V. Rybin, *em JETP Lett.* **109** 347 (2019).
- [4] X. Huang *et al*, *Nature Mater.* **10** 582 (2011).
- [5] J.W. Dong *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **114** 163901 (2015).
- [6] A.N. Poddubny, E.L. Ivchenko, *J. Phys. E* **42** 1871 (2010).
- [7] E.L. Ivchenko, A.N. Poddubny, *Phys. Solid State* **5** 905 (2013).

Влияние асимметричных барьерных слоев на паразитную рекомбинацию в лазерной гетероструктуре

М.Е. Муретова

СПбАУ РАН, Санкт-Петербург, Россия

Наличие паразитной волноводной рекомбинации в лазерной гетероструктуре является существенной проблемой, негативно влияющей на лазерные характеристики и приводящей к снижению выходной оптической мощности и КПД и ухудшению температурной стабильности. Концепция асимметричных барьерных слоев (АБС) является одним из способов решения этой проблемы [1]. Два дополнительных тонких слоя располагаются по обе стороны от активной области и препятствуют биполярной заселенности волноводных слоев, предотвращая таким образом возникновение в них паразитной рекомбинации. В идеальном случае АБС со стороны n -эмиттера (p -эмиттера) полностью блокирует попадание дырок (электронов) в прилегающий к нему волноводный слой, и при этом не влияет на поступление электронов (дырок) в активную область. Это должно существенно снизить негативное влияние паразитной рекомбинации на приборные характеристики и привести к улучшению характеристической температуры порогового тока и выходной оптической мощности [2]. Однако в реальности тонкие слои обладают туннельной прозрачностью, что приводит к нежелательной утечке носителей заряда сквозь барьеры, и блокировка носителей происходит не полностью. Теоретическая модель гетероструктур с АБС, подробно описанная в работе ([3]) не учитывает этот эффект.

В настоящей работе представлена теоретическая модель лазера с АБС с учетом туннельной прозрачности барьерных слоев, основанная на системе скоростных уравнений. Критерием эффективности АБС предлагается считать степень подавления паразитных потоков частиц S относительно потоков аналогичной структуре без АБС. Задачей данной работы является определение степени подавления паразитных потоков, необходимой для того, чтобы снижение негативного влияния паразитной рекомбинации можно было считать существенным.

На основе построенной теоретической модели была разработана программа для численного моделирования, позволяющая рассчитать выходные ха-

рактеристики лазерной гетероструктуры с АБС и определить эффективность АБС. На примере лазера на квантовой яме InGaAs/GaAs ($\lambda = 980$ нм исследовано влияние утечек сквозь АБС на приборные характеристики. Обнаружено, что для такой структуры АБС станут эффективными при степенях подавления $C \geq 102$, а при $C \approx 2.3 \cdot 10^4$ будет подавлено 90% паразитного тока. В работе также исследовано влияние АБС на полезные потоки частиц, поступающих в активную область.

В данный момент ведется разработка программы для поиска наиболее оптимальных конструкций гетероструктур с АБС, подобного поиска, произведенному ранее [4, 5], с уточненными критериями эффективности АБС и с учетом полученной связи характеристик барьера с выходными характеристиками прибора.

Литература

- [1] L.V. Asryan, S. Luryi, *Solid-State Electron.* **47** 205 (2003).
- [2] L.V. Asryan, N.V. Kryzhanovskaya, M.V. Maximov, *et al*, *Semicond. Sci. Technol.* **426** 055025 (2011).
- [3] Л.В. Асрян, Ф.И. Зубов, Ю.С. Балезина (Полубавкина) и др. *ФТП*, **52** (12), 1518–1526 (2018).
- [4] F.I. Zubov, M.E. Muretova, L.V. Asryan, *et al*, *J. Appl. Phys.* **124**(13) 133105 (2018).
- [5] F.I. Zubov, M.E. Muretova, L.V. Asryan, *et al*, *Semiconductors*, **52** (14), 1905–1908 (2018).

Процессы формирования и оптические свойства эпитаксиальных наночастиц GaAs на Si

Г.А. Сапунов

СПбАУ им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург, Россия

Монолитное объединение Si электроники с фотонными структурами на основе прямозонных полупроводников АПВВ представляет большой научный и экономический интерес [1]. Основные проблемы синтеза планарных гетероструктур АПВВ/Si вызваны большим рассогласованием кристаллической решетки [2] и образованием антифазных доменов [3], негативно влияющих на электрические и оптические свойства материала. В отличие от планарных гетероструктур, эпитаксиальные наноструктуры обладают высоким отношением поверхности к объему [4,5], обеспечивая эффективную релаксацию упругих напряжений и низкую концентрацию структурных дефектов даже в систе-

мах с сильным рассогласованием кристаллических решеток (рассогласование GaAs и Si $\sim 4.2\%$) [6,7].

Цель данной работы — изучение формирования и оптических свойств наночастиц GaAs, синтезированных на Si(111) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что GaAs формируется в виде ограниченных наночастиц, окруженных сплошным слоем коалесцированных островков GaAs. В работе исследовано изменение морфологии наночастиц в процессе роста. Наблюдаемое изменение косвенно подтверждает предположение, что наночастицы образуются по механизму пар-жидкость-кристалл, и скорость их роста значительно уменьшается после расхода Ga капли, поскольку поступающий материал начинает преимущественно встраиваться в сплошной слой.

Морфология наноструктур изучались методом атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Показано, что поверхностная плотность и форма наночастиц сильно зависят от температуры роста и отношения молекулярных потоков. Повышение потока As или понижение температуры роста подавляет диффузию Ga адатомов, что приводит к увеличению поверхностной плотности и уменьшению размера наночастиц. Ориентация граней наночастиц указывает на огранку плоскостями $\{111\}$, $\{110\}$ и $\{3\bar{1}1\}$

Оптические свойства изучены методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и фотолюминесценции (ФЛ) индивидуальных наночастиц. На спектрах КР отдельных эпитаксиальных наночастиц GaAs присутствует поперечная мода, характерная для GaAs в вюрцитной фазе. Сигнал ФЛ от наночастиц при комнатной температуре почти на два порядка выше сигнала от непрерывного слоя, что указывает на более высокое кристаллическое качество. Несмотря на отличие в электронной структуре GaAs в фазе вюрцита и сфалерита, на спектрах ФЛ наночастиц с вюрцитной фононной модой отсутствуют какие-либо отличительные особенности.

Результаты работы демонстрируют потенциал применения эпитаксиальных наночастиц GaAs на Si как оптически активных наноструктур с контролируемой морфологией.

Литература

- [1] Y.B. Bolkhovityanov, O.P. Pchelyakov *Physics-Uspekhi* **51** (5) 437-456 (2008).
- [2] F. Komarov, L. Vlasukova, O. Milchanin, *et al*, *Mater. Sci. Eng. B* **178** (18) 1169–1177 (2013).
- [3] P.N. Uppal, H. Kroemer *J. Appl. Phys.* **58** (6) 2195–2203 (1985).
- [4] A.D. Bolshakov, V.G. Dubrovskii, X. Yan, *et al*, *Tech. Phys. Lett.* **39** (12) 1047–1052 (2013).
- [5] M. Tchernycheva, C. Sartel, G. Cirlin, *et al*, *Nanotechnology* **18** (38) 385306 (2007).

- [6] Yu.B. Samsonenko, G.E. Cirlin, A.I. Khrebtov, *et al*, *Semiconductors* **45** (4) 431–435 (2011).
- [7] V.V. Fedorov, A.D. Bolshakov, D.A. Kirilenko, *et al*, *Cryst. Eng. Comm.* **20** (24) 3370–3380 (2018).

Собственная локализация света в трехмерных икосаэдрических квазикристаллах

А.Д. Синельник

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Квазикристаллы представляют собой отдельный класс структур, которые обладают дальним порядком, но не имеют трансляционной симметрии [1]. Таким образом, квазикристаллы можно рассматривать как третью форму конденсированного состояния, которая (располагается) между кристаллическими и аморфными материалами. Впервые квазикристаллы были исследованы Лавени и Шехтманом в 1984 году [2]. Авторы продемонстрировали четкую рентгенограмму, которая обладает нетрадиционной осью симметрии C_{10} у металлического твердого тела с дальним ориентационным порядком. В данной работе изучались трехмерные икосаэдрические квазикристаллы, имеющие различные оси симметрии в зависимости от ориентации в пространстве, в том числе оси C_5 . Физика квазикристаллов уже принесла целый ряд интригующих результатов и в то же время содержит много нерешенных вопросов.

Для изготовления икосаэдрических квазикристаллов микронных размеров мы использовали технологию двухфотонной литографии. Эта технология позволяет создавать трехмерные структуры с разрешением в несколько сотен нанометров. Структуры были созданы с использованием гибридного органо-неорганического материала на основе пропоксида циркония с фотоинициатором Irgacure 369, коэффициент преломления 1.54. Структура икосаэдрических квазикристаллов задавалась в соответствии с правилами замещения [3] и состояла из вытянутых ромбоэдров, ромбических додекаэдров, ромбических икосаэдров и ромбических триаконаэдров в качестве строительных блоков. Общее число элементов — 8112. Длина элемента, который является стороной ромбического триаконаэдра, составляла 3 мкм, а диаметр около 0.5 мкм. Соответствие полученных структур исходной модели было проверено методом сканирующей электронной микроскопии.

Андерсоновская локализация света ранее наблюдалась экспериментально в неупорядоченных фотонных структурах [4], по аналогии с локализацией

электронов в структурах с беспорядком. Недавно в работе [5] был теоретически предсказан эффект внутренней локализации света в упорядоченных икосаэдрических квазикристаллах. Созданные нами образцы мы исследовали методами оптической дифракции, а также в экспериментах по пропусканию света с использованием пикосекундного лазера с импульсами длительностью 150 пс. Кроме икосаэдрических квазикристаллов в экспериментах мы использовали также созданные методом двухфотонной литографии и хорошо исследованные нами фотонные кристаллы со структурой ⟨поленицы⟩ в качестве репера, не обладающего эффектами локализации. Результаты экспериментов демонстрируют наличие собственной локализации в квазикристаллах: анализ кривых затухания интенсивности с разрешением по времени выявил медленный процесс, время жизни которого намного больше, чем у процесса, связанного с баллистическим транспортным режимом в структуре ⟨поленицы⟩. Кроме того, мы наблюдали свечение всего объема образцов квазикристаллов, напоминающее свечение лампы, в то время как через ⟨поленицу⟩ луч проходил обычным образом без дополнительного рассеяния во все стороны. В этом случае можно провести некоторую аналогию со случайными лазерами [6], когда генерация излучения наблюдается в произвольных направлениях в пространстве из полностью неупорядоченной среды. Наши экспериментальные результаты подтверждают вывод [7] о наличии локализации света в упорядоченных квазикристаллах. Насколько нам известно из литературы, такой экспериментальный результат получен впервые.

Выражаю благодарность М.Ф. Лимонову и М.В. Рыбину за обсуждение результатов работы.

Литература

- [1] Janot C *Quasicrystals: A Primer* (New York: Oxford University Press) (1994).
- [2] Shechtman D, Blech I, Gratias D *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **53** (1984).
- [3] Seung-Yeol Jeon, Hyungho Kwon and Kahyun Hur *Nature Physics* **13** (2017)
- [4] Segev M., Silberberg Y., Christodoulides D.N. *Nature Photonics* **7** (2013)
- [5] Liu J. *et al*, *Nature Nanotechnology* **9** (2014)

Влияние эффектов спинового взаимодействия на угловые зависимости основных параметров ЭПР в компенсированных полупроводниках

Р.Р. Ситдииков

СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

При достижении критического уровня легирования за счет обменного взаимодействия между примесными центрами в полупроводнике образуется примесная зона и происходит так называемый фазовый переход изолятор–металл, который проявляется не только в транспортных, но и магнитных свойствах [1]. Следует ожидать, что увеличение обменного взаимодействия вблизи фазового перехода изолятор–металл может приводить к возникновению магнитоупорядоченных состояний, о наблюдении которых говорится в ряде экспериментальных исследований. Однако, ввиду малости величин эффектов возникают сложности при исследовании их методами магнитометрии [2]. Для подтверждения факта возможного образования магнитоупорядоченных состояний, в качестве дополнительного независимого подтверждения, возможно использование методики электронного парамагнитного резонанса. Данная методика

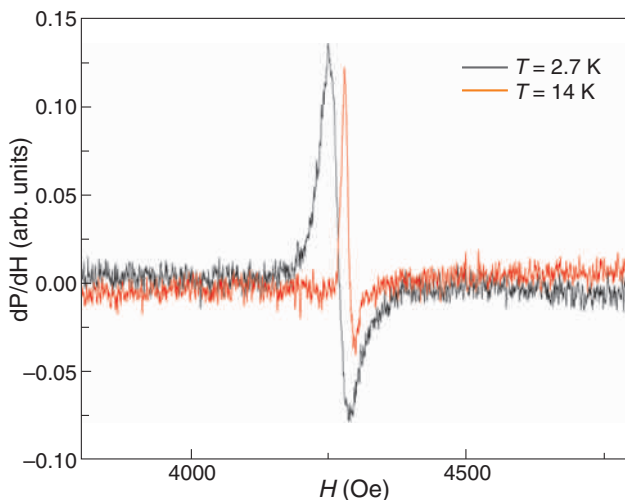


Рис. 1. Температурная зависимость линий поглощения при угле $\alpha = 105^\circ$

позволяет достаточно точно отслеживать изменения в спиновой системе [3]. При исследовании электронного парамагнитного резонанса в твердом теле параметры спектров определяются структурой кристаллической решётки. Следует предположить, что появление магнитноупорядоченных состояний будет проявляться в анизотропии угловых зависимостей спектров электронного парамагнитного резонанса.

Целью данной работы является исследование влияние образующихся магнитноупорядоченных состояний в компенсированном полупроводнике Ge:As вблизи фазового перехода изолятор–металл, где ранее наблюдалось изменение типа магнитного упорядочения с изменением температуры, на экспериментальные угловые зависимости таких параметров спектров электронного парамагнитного резонанса, как g -фактор, амплитуда сигнала и форма линии поглощения.

В результате исследования были обнаружены различия угловых зависимостей данных параметров при различных температурах (Рис. 1) для серии образцов Ge:As, что подтверждает гипотезу об изменении типа магнитного упорядочения в данных образцах с температурой.

Литература

- [1] A.G. Zabrodskii, A.I. Veinger, P.V. Semenikhin, *Phys. Status Solidi B*, 1900249, (2019).
- [2] M.A. Garcia *et al*, *J. Appl. Phys.* **105**, 013925, (2009).
- [3] Nguyen Thi Thanh Binh, V.Yu. Dolmatov, N.M. Lapchuka, *J. Appl. Spectrosc.*, **84**, 6 (2018).

Экситонные свойства многослойных нанотрубок и нанопластин на основе MoS₂

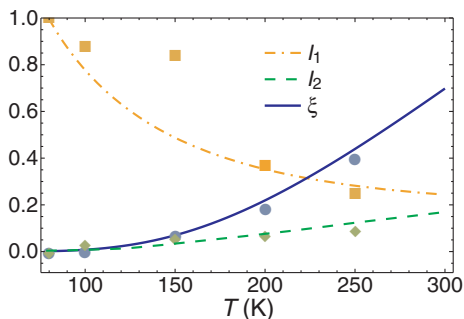
О.О. Смирнова

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

После недавнего обнаружения люминесценции от одиночных нанотрубок и нанопластин, такие объекты становятся хорошими кандидатами для приложений в нанопотонике в качестве нано-излучателей [1]. В связи с этим становится необходимым как изучение экспериментальных свойств, так и теоретическое описание экситонных характеристик таких структур. Монослойные нанотрубки представляют собой интерес в первую очередь потому, что они должны наследовать свойства монослоя, то есть быть прямозонными и демонстрировать яркое излучение прямого экситона [2]. Но на данный момент нет технологии, которая позволяла бы изготавливать монослойные нанотрубки на

основе дихалькогенидов переходных металлов — все образцы, полученные с помощью методов химического синтеза, оказываются многослойными. Для таких образцов экспериментально было обнаружено сосуществование полос излучения прямого и непрямого экситонов при комнатной температуре. Следует отметить, что уровни непрямого экситона являются нижними по энергии, но их люминесценция отсутствует при значениях температуры ниже 80–100 К.

В данной работе для теоретического описания наблюдаемого эффекта предлагается модель, описывающая баланс излучения и переноса возбуждения в системе, включающей уровни прямого и непрямого экситона, что требует учета тонкой структуры экситонных уровней в подсистемах. В прямом экситоне нижний по энергии уровень является светлым [3], что объясняет его яркую люминесценцию при низких температурах, а для непрямого экситона предполагаем, что нижним оказывается темное состояние. Сравнивать образцы между собой можем с помощью параметра, характеризующего относительную интенсивность люминесценции прямого I_1 и непрямого I_2 экситона $\zeta = I_2/I_1$. Подгоночными параметрами в системе являются расщепления между темным и светлым состоянием в прямом и непрямом экситоне, соотношение между излучательной скоростью светлого состояния непрямого экситона и его полной безызлучательной рекомбинацией, а также отношение скорости релаксации из прямого экситона в непрямой (считаем невозможным обратный переход) и радиационной скорости светлого состояния прямого экситона.



Моделирование показало, что достаточно стабильным параметром является расщепление в непрямом экситоне, которое составляет порядка 90–100 мэВ для пластинок и 45–50 мэВ для нанотрубок.

Для прояснения физической сути подгоночных параметров были исследованы образцы, которые были подвергнуты интерколяции для получения системы изолированных монослоев. При моделировании для них были получены значения расщепления между темным и светлым состоянием прямого эксито-

на, близкие к литературному значению для монослоя (2–3 мэВ) [3]. Для необработанных структур учет населенностей более высоких по энергии темных состояний производится с помощью интегрирования по плотности состояний для трехмерного случая. При таком подходе отдельно построенные интенсивности достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что показано на рисунке для необработанной трубки.

По имеющимся на данный момент экспериментальным и теоретически рассчитанным данным нельзя полностью описать наблюдаемую картину. Планируются дополнительные измерения фотолюминесценции одиночных структур с небольшим числом монослоев, в том числе со временным разрешением при различных значениях температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00273).

Литература

- [1] T.V. Shubina, M. Remškar, V.Yu. Davydov, *et al*, *Annalen der Physik*, **531**, 1800415 (2019).
- [2] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, *et al*, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 136805 (2010).
- [3] M.V. Durnev and M.M. Glazov, *Phys. Usp.*, **61**, 825 (2018).

Экспериментальная оценка параметров локализации тока в низковольтных полупроводниковых гетероструктурах

О.С. Соболева

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Петербург, Россия

Одной из ключевых особенностей работы полупроводниковых токовых ключей в условиях высокой плотности протекающего тока является тенденция к локализации тока. Эта проблема характерна и для мощных лазеров-тиристоров [1,2], где высокая скорость переключения обеспечивается наличием ударной ионизации.

Представляет интерес непосредственное исследование характеристик токовых шнуров, в частности, размеров, концентрации носителей заряда и скорости их распространения. Предложена методика, основанная на наблюдении модуляции излучения от внешнего лазера-источника, проходящего через образец, в условиях протекания электрического тока. В работе [3] такой подход

использовался для оценки внутренних оптических потерь в мощных полупроводниковых лазерах, которые удалось связать с поглощением на свободных носителях заряда. В [4] методика была расширена для диагностики токовых шнуров в мощных лазерах-тиристорах, где было так же показано наличие модуляции проходящего излучения поглощением на свободных носителях заряда. Проведено пространственное сканирование вдоль торцов образца с целью выяснения изначального положения токового шнура, его диаметра и скорости распространения.

Основную сложность вызывал тот факт, что оставались неизвестными и коэффициент поглощения на свободных носителях, и концентрация носителей, и длина пути излучения в области с повышенной плотностью тока. Повсеместное применение методики было ограничено отсутствием адекватной модели, позволяющей однозначно интерпретировать результаты измерений. Для упрощения задачи создания такой модели были изготовлены экспериментальные образцы, в которых реализована независимая накачка током отдельных их участков известных размеров. Этот подход позволил оценить изменение коэффициентов поглощения на свободных носителях при заданных плотностях тока, что поможет перенести усовершенствованную модель на исследование других типов полупроводниковых приборов.

Автор выражает благодарность С.О. Слипченко, А.А. Подоскину, П.С. Гавриной, Д.Н. Романовичу и Н.А. Пихтину за оказанную помощь в работе. Исследования проводились при поддержке РФФИ (проект № 18-38-00906 «Закономерности формирования и развития пространственных неоднородностей тока в низковольтных полупроводниковых гетероструктурах с нелинейной обратной связью»).

Литература

- [1] S.O. Slipchenko *et al*, *J. Appl. Phys.*, **121**, 054502, (2017).
- [2] O. S. Soboleva *et al*, *International Conference Laser Optics*, IEEE, 165 (2018).
- [3] Д. А. Веселов и др., *Квантовая электроника*, **45**, 604–606 (2015).
- [4] П. С. Гаврина и др., *Письма в журнал технической физики*, **8**, 7 (2019).

Влияние плоскостной деформации растяжения на гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута и $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}$

А.В. Суслов

РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время в области физики полуметаллов и узкозонных полупроводников исследования, использующие методы деформационной инженерии, переживают бурный расцвет [1]. Однако в большинстве работ по исследованию влияния деформации на физические свойства тонких пленок деформация создается посредством использования несоответствия постоянных решетки материала пленки и подложки, что требует использования очень тонких пленок. Например, для пленок висмута влияние несоответствия постоянных решетки пленки и подложки в процессе напыления нивелируется уже на 3–5 бислое [2].

Деформация пленки, возникающая в результате несоответствия коэффициентов температурного расширения пленки и подложки, позволяет исследовать пленки больших толщин. Однако в данном случае неконтролируемое различие структуры пленок значительно осложняет интерпретацию результатов. Также величина деформации существенно ограничена типом подложки и зависит от температуры, при которой ведутся измерения.

В данной работе представлен способ создания деформации растяжения в плоскости подложки непосредственно в процессе измерения электрических и гальваномагнитных свойств одной и той же пленки и результаты исследования пленок Bi и $\text{Bi}_{0.95}\text{Sb}_{0.05}$ различной структуры на подложках из стекла.

Методика создания деформации заключается в купольном изгибе подложки, в результате чего пленка, сформированная на ее поверхности оказывается в условиях плоскостного растяжения (рис. 1)

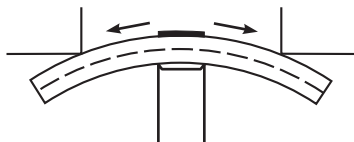


Рис. 1. Схема деформации подложки для получения пленки в состоянии растяжения в плоскости подложки

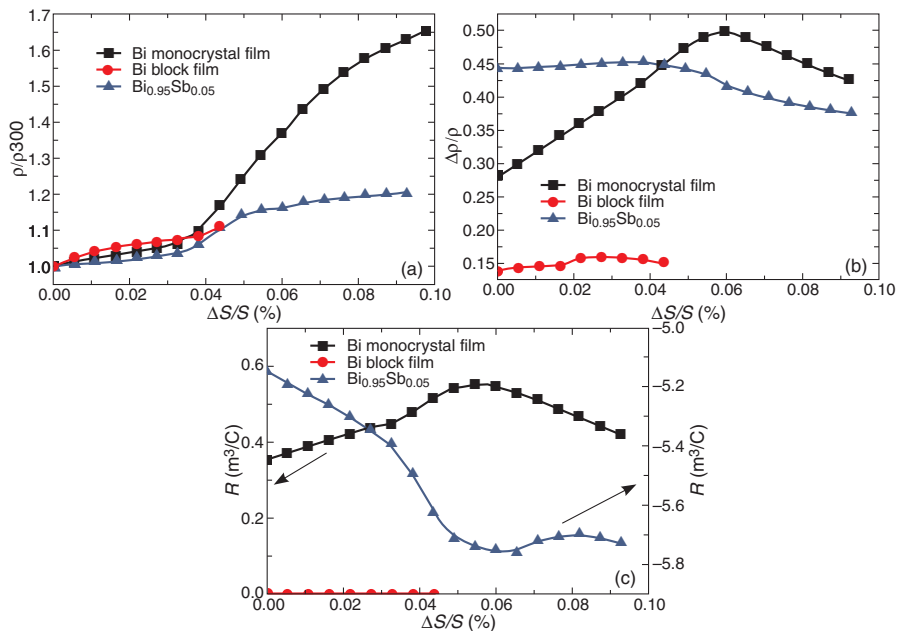


Рис. 2. Зависимости гальваномагнитных и электрических свойств от деформации при температуре $T = 77$ К: (а) удельное сопротивление; (б) магнетосопротивление; (с) коэффициент Холла

Величина деформации определяется смещением плунжера, изгибающего подложку, которое измеряется микрометрическим винтом и толщиной подложки. В данном случае использовалось боросиликатное стекло толщиной 150 мкм, что позволяет создавать деформацию до 0.1%.

В качестве объектов исследования использовались пленки висмута монокристаллической и блочной структуры, а также блочные пленки висмут-сурьма с содержанием сурьмы 5 at.%. Блочная пленка висмута получена при температуре отжига близкой к температуре плавления для получения мелкоблочной кристаллической структуры.

Измерение электрических и гальваномагнитных свойств велось по классической четырехпроводной схеме в при постоянной температуре в постоянном магнитном поле.

Результаты исследования удельного сопротивления, магнетосопротивления и коэффициента Холла представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что с увеличением деформации плоскостного растяжения происходит увеличение удельного сопротивления всех пленок, однако скорость роста сопротивления

непостоянна. При деформации в окрестности 0.03–0.04% наблюдается излом. Зависимость удельного сопротивления от деформации для пленок висмута имеет тенденцию к насыщению, а в пленках 5 at.% Sb наблюдается второй излом. Аналогичные перегибы наблюдаются на зависимостях коэффициента Холла от деформации. Магнетосопротивление изменяется немонотонно. При малых деформациях магнетосопротивление увеличивается и достигает максимума. Максимум магнетосопротивления смещается в область меньших значений деформации при увеличении содержания сурьмы. Причем подобный характер зависимостей проявляется вне зависимости от структуры пленок.

При исследовании деформации, возникающей вследствие несоответствия коэффициентов температурного расширения пленки и подложки нами было обнаружено, что деформация плоскостного растяжения вызывает понижение потолка валентной зоны и повышение дна зоны проводимости по энергетической шкале относительно уровня Ферми [3]. С учетом схемы движения энергетических экстремумов при увеличении концентрации сурьмы в сплаве такое поведение гальваномагнитных коэффициентов в зависимости от деформации может быть проявлением электронных топологических переходов, что представляется весьма интересным. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-32-00430)

Литература

- [1] A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, *et al*, *Phys. Usp.* **61** 1175–1212 (2018).
- [2] K.F. Zhang, Fang Yang, Y.R. Song, *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **107** 121601 (2015).
- [3] A.V. Suslov, V.M. Grabov, V.A. Komarov, *et al*, *Semiconductors* **53(5)**, 611–614 (2019).

Исследование эффектов намагничивания методом электронного спинового резонанса в Si:P, компенсированном радиационными дефектами

А.А. Таланин

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

Одним из перспективных путей развития микроэлектроники является спинтроника, где перенос информации будет осуществляться спиновым током. Для создания приборов спинтроники важно знать механизмы упорядочения спинов в материале. В данной работе рассматриваются возможности возникновения упорядочения спинов в примесной подсистеме за счет обменного

взаимодействия при введении немагнитных примесей в полупроводник в значительных концентрациях, близких к фазовому переходу изолятор–металл [1–4].

Для управления параметрами обменного взаимодействия в легированный до концентраций близких к критическим для перехода изолятор–металл Si:P компенсировался радиационными дефектами. Для определения наличия магнитного порядка в данной работе используются две методики измерения: ЭПР и СКВИД-магнитометрия.

С помощью сигнала ЭПР была построена температурная зависимость магнитной восприимчивости, где при температуре $20 > T > 80$ К наблюдалось характерное для антиферромагнитного упорядочения уменьшение скорости роста магнитной восприимчивости относительно закона Кюри. Измерения СКВИД-магнитометрии показали признаки ферромагнетизма с характерной петлёй гистерезиса.

Из полевых зависимостей магнитной восприимчивости была построена температурная зависимость остаточной намагниченности. Анализ которых показал присутствие в образце несколько магнитных подрешёток, каждая из которых имеет свою температуру Кюри. Ферромагнитное упорядочение, обусловленное обменным взаимодействием спинов, локализованных на атомах примеси, пропадает при температуре порядка 50 К, и при температурах до 230 К основным механизмом, обуславливающим ферромагнетизм, является взаимодействие электронов, локализованных на радиационных дефектах.

Автор выражает благодарность А.И. Вейнгеру, П.В. Семенихину, И.В. Кочману за помощь при проведении экспериментов и обсуждение результатов.

Литература

- [1] M. Reznikov, A.Yu. Kuntsevich, N. Tench, *et al*, *JETP Letters*, **92**, 470 (2010).
- [2] Yu Liu, Chang Wang, Chunhong Wang, *et al*, *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 087205 (2011).
- [3] A.I. Veinger, A.G. Zabrodskii, T.L. Makarova, *et al*, *J. Exp. Theor. Phys.*, **143**, 918 (2013).
- [4] Kamimura. In book “Crystalline Semiconducting Materials and Devices”. Ed by P.N. Butcher, N.H. March and M. Tosi, (Plenum, 1986) p.305.

Увеличение скорости излучательной рекомбинации в резонансной частице свинцово-галогидного перовскита

П.А. Тонкаев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Галогидные перовскиты привлекли внимание исследователей благодаря своим выдающимся фотовольтаическим свойствам [1]. Однопереходные солнечные элементы на основе перовскита продемонстрировали повышение эффективности с 3.8% [2] до более чем 21% [3] менее чем за 10 лет. Возможность перестройки ширины запрещённой зоны за счёт изменения галогена в составе делают перспективным использование этого материала в качестве светоизлучающих устройств [4].

Перовскиты имеют высокую внутреннюю квантовую эффективность, однако высокое значение показателя преломления света не позволяет всему излучению выйти из материала в планарной геометрии устройства. Это излучение перепоглощается и таким образом усиливает безызлучательную рекомбинацию. С другой стороны, высокий показатель преломления позволяет частицам созданным из перовскита поддерживать Ми-резонансы в оптической области [5]. Более того в таких частицах может увеличиваться скорость спонтанного излучения за счёт эффекта Парселла [6].

В этой работе используется кинетическая модель, так же называемую ABC-модель, которая показала хорошее согласование экспериментальных результатов и теоретического описания [7]. Модель предполагает, что поглощённые фотоны генерируют носители заряда, которые могут рекомбинировать излучательно или безызлучательно. В качестве безызлучательных каналов выступают релаксация носителей на дефектах и Оже-рекомбинация. Первый линейно пропорционален плотности сгенерированных носителей, второй — кубически. Радиационная рекомбинация пропорциональна квадрату плотности носителей в приближении низкой концентрации собственных носителей заряда.

На основе этой модели и аналитического расчёта фактора Парселла для сферической частицы было установлено, что для резонансной частицы MAPbI_3 , с диаметром 280 нм и длиной волны излучения 770 нм, скорость излучательной рекомбинации может быть увеличена в 3 раза, а квантовая эффективность фотолуминесценции при этом достигает значения порядка 0.9.

Численный расчёт для кубической частицы CsPbBr₃ даёт похожие значения.

Литература

- [1] H.J. Snaith, *Nature materials*. **17** (5) 372 (2018).
- [2] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, *et al*, *em J. Am. Chem. Soc.* **131** (17) 6050–6051 (2009).
- [3] M.A. Green *et al*, *Prog. Photovolt.* **26** (7), 427–436 (2018).
- [4] B.R. Sutherland, E.H. Sargent, *Nature Photonics* **10** (5), 295 (2016).
- [5] E.Y. Tiguntseva *et al*, *Nano Letters* **18** (2), 1185–1190 (2018).
- [6] P. Tonkaev, G. Zograf, S. Makarov, *Nanoscale* **11** (38), 7800–17806 (2019).
- [7] J.M. Richtel *et al*, *Nature communications* **7**, 13941 (2016).

Связанные состояния в континууме с точки зрения мультипольного разложения

К.С. Фризюк

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Метаповерхности на основе диэлектрических наноструктур позволяют эффективно контролировать волновой фронт, являясь основой для плоских оптических приборов. Такие поверхности обладают высокодобротными резонансами, в связи с существованием т.н. связанных состояний в континууме (ССК) [1]. Эти состояния не взаимодействуют с падающими плоскими волнами и не излучают в дальнее поле, но могут наблюдаться высокодобротные резонансы при незначительном нарушении симметрии системы.

Использование наноструктур связано с тем, что они обладают Ми-резонансами, позволяющими значительно усиливать поля. Поэтому широко применяется мультипольное разложение полей в различных наноструктурах [2,3].

Рассматривается двумерная метаповерхность с квадратной решеткой, в которой возможны связанные состояния в континууме. В метаповерхностях известны два типа ССК: симметрично-защищенные и случайные. В первом случае для их существования необходима и достаточна поворотная симметрия системы C_2^z (метаповерхность расположена в плоскости xy), для существования случайных ССК необходима симметрия к инверсии и отражению в плоскости $z = 0$ [4]. В работе исследуются эти состояния с помощью мультипольного разложения полей в каждой отдельной ячейке, что является новым методом описания таких систем [5]. Поскольку поле каждой ячейки представляется в виде разложения по векторным сферическим функциям, а дальнее

поле от метаповерхности удобнее представлять в виде разложения по плоским волнам, было получено выражение, связывающее поле отдельной j -й ячейки \mathbf{E}^{j-cell} с излучаемой волной \mathbf{E}^{far} :

$$\mathbf{E}^{j-cell}(\mathbf{r}) = E_0 \sum_{p_i, p_r, m, n} D_{p_i p_r m n} \mathbf{W}_{p_i p_r m n}^{(3)}(\mathbf{k}, \mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \cdot e^{i(\mathbf{k}_b \cdot \mathbf{r}_j)}$$

где $\mathbf{W}_{p_i p_r m n}^{(3)}$ — векторная сферическая гармоника, определяемая числами p_i, p_r, m, n , D — коэффициент разложения, \mathbf{k}_b — блоховский волновой вектор.

$$\mathbf{E}^{far}(\mathbf{r}) = \frac{E_0 V_b}{2\pi k k_z} e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} \sum_{\substack{p_i, p_r \\ m, n}} i^{-n} D_{p_i p_r m n} \left[\mathbf{Y}_{p_i p_r m n} \left(\frac{\mathbf{k}}{k} \right) \right]$$

Здесь $\mathbf{Y}_{p_i p_r m n}$ — шаровой вектор в направлении волнового вектора \mathbf{k} .

Был проведен симметричный анализ мод для квадратной решетки, состоящей из сферических частиц, на основе которого предсказан мультипольный состав ячейки в различных точках зоны Бриллюэна. Было показано, что симметрично-защищенными ССК являются те моды, которые не содержат мультиполей с числом $m = 1$. Кроме того, было подтверждено условие существования случайных ССК [6], связанное с тем, что коэффициенты мультипольного разложения должны быть в фазе.

Обычно ССК существуют в Γ -точке, или для каких-то конкретных k_b в долинах зоны Бриллюэна. Однако на основе полученного описания, была предсказана возможность существования другого типа ССК, который занимает замкнутое кольцо в зоне Бриллюэна вокруг Γ -точки, а не одно выделенное направление.

Литература

- [1] C.W. Hsu, B. Zhen, A.D. Stone, *et al*, *Nat. Rev. Mater.* **1**, 16048 (2016).
- [2] S. Kruk and Yu. Kivshar, *ACS Photonics* **4** (11), 2638–2649,(2017).
- [3] P. Grahn, A. Shevchenko, and M. Kaivola, *New J. Phys.* **14**, 093033 (2012).
- [4] B. Zhen, C.W. Hsu, L. Lu, *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 257401, (2014).
- [5] Z. Sadrieva, K. Frizyuk, M. Petrov, *et al*, *Phys. Rev. B* **100**,115303, (2019).
- [6] C.W. Hsu, Bo Zhen, J. Lee, *et al*, *Nature* **499**, 188 (2013).

Для заметок

**Международная зимняя школа
по физике полупроводников
2020**

**Научные сообщения
молодых ученых**

ISBN 978-5-93634-064-2

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»
188350, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 37, тир. 150, уч.-изд. л. 4,25, 10.02.2020 г.