

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики твердого тела Российской академии наук**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

Российский научный фонд (РНФ)

**ПЕРВАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ»**

Сборник тезисов



*20 июня 2019 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики твердого тела Российской академии наук**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

Российский научный фонд (РНФ)

**ПЕРВАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ»**

Сборник тезисов

*20 июня 2019 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

**ПЕРВАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ»**

20 июня 2019 года

г. Черноголовка, Московская обл.

Программный комитет:

1. **Кукушкин Игорь Владимирович** (ИФТТ, Черноголовка) – председатель.
2. **Тимофеев Владислав Борисович** (ИФТТ, Черноголовка)
3. **Кулаковский Владимир Дмитриевич** (ИФТТ, Черноголовка)
4. **Волков Владимир Александрович** (ИРЭ, Москва)
5. **Сибельдин Николай Николаевич** (ФИАН, Москва)
6. **Кулик Леонид Викторович** (ИФТТ, Черноголовка)
7. **Сазонов Андрей Гаврилович** (ООО «Южполиметал», Москва)
8. **Дремин Алексей Анатольевич** (ООО «МВЭЙВ», Москва)
9. **Ваньков Александр Борисович** (ООО «РамМикс», Черноголовка)

Организационный комитет:

1. **Кукушкин Игорь Владимирович** (ИФТТ, Черноголовка) – председатель.
2. **Морозова Елена Николаевна** (ИФТТ, Черноголовка)
3. **Федотова Яна Викторовна** (ИФТТ, Черноголовка)
4. **Родная Анна Игоревна** (ИФТТ, Черноголовка)
5. **Ермакова Ольга Николаевна** (ИФТТ, Черноголовка)
6. **Лангваген Екатерина Сергеевна** (ИФТТ, Черноголовка)

ISBN 978-5-6040418-2-6



ISBN: 978-5-6040418-2-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИГЛАШЕННЫЕ ДОКЛАДЫ

<u>А. Б. Ваньков.</u> Магнитооптика двумерных электронных систем в структурах ZnO/MgZnO	6
<u>В. А. Волков.</u> Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах. Введение в теорию.....	7
<u>С. С. Гаврилов.</u> Пространственно-временной хаос в системе экситонных поляритонов.....	8
<u>А. В. Горбунов, В. Б. Тимофеев.</u> Когерентность бозе-конденсата дипольных экситонов.....	9
<u>С. И. Дорожкин.</u> Динамическая структура доменов спонтанного электрического поля в индуцированном микроволновым излучением состоянии с малой диссипацией на постоянном токе.....	10
<u>А. А. Заболотных, В. А. Волков.</u> Плазменные колебания в частично экранированной двумерной электронной системе.....	11
<u>A. Seedhouse, J. Wilkes, E. A. Muljarov, В. Д. Кулаковский.</u> Генерация терагерцового излучения дипольными экситонными поляритонами в GaAs микрорезонаторах.....	12
<u>Л. В. Кулик.</u> Применение рамановской спектроскопии в области контроля безопасности лекарственных препаратов.....	13
<u>А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, Е. В. Филатов.</u> Циркулярно-поляризованное излучение света в искусственно созданных хиральных полупроводниковых наноструктурах	14
<u>В. М. Муравьев, П. А. Гусихин, И. В. Андреев, С. И. Губарев.</u> Новые плазменные возбуждения в двумерных электронных системах.....	15
<u>В. И. Кукушкин, Я. В. Гришина, В. В. Соловьев, И. В. Кукушкин.</u> Размерный плазмон-поляритонный резонанс и его вклад в гигантское усиление рамановского рассеяния света	16
<u>А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, Е. В. Филатов.</u> Спиновая динамика ионов Mn^{2+} при фотовозбуждении наноструктур на основе A_2B_6 полупроводников во внешних магнитных полях.....	17
<u>А. В. Горбунов, В. Б. Тимофеев.</u> Корреляции интенсивности люминесценции в условиях экситонной	18
<u>В. В. Рязанов</u> Реализация сверхпроводниковых однокубитных и двухкубитных квантовых вентилях как основы квантовых процессоров.....	19
<u>А. В. Щепетильников, А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов.</u> Индуцированные микроволновым излучением осцилляции сопротивления в ZnO/MgZnO гетеропереходах.....	20

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

<u>И. В. Андреев, А. А. Фортунатов, А. А. Дрёмин .</u> Осесимметричные магнитоплазменные возбуждения в двумерных электронных системах	21
<u>В. Н. Белянин, И. В. Андреев, В. М. Муравьев.</u> Тонкая структура циклотронного резонанса в двумерных электронных системах.....	22
<u>В. Е. Бисти.</u> Возбуждения зарядовой и спиновой плотности в двойных электронных слоях с управляемой симметрией в сильном магнитном поле.....	23
<u>А. С. Бричкин.</u> Фотолюминесценция экситонов и трионов в связанных квантовых ямах с монослоями $MoSe_2/WSe_2$	24

<u>А. Б. Ваньков, Б. Д. Кайсин.</u> Термодинамика изинговых квантово-холловских ферромагнетиков	25
<u>П. А. Гусихин, А. А. Дремин, В. М. Муравьев.</u> Новая система персонального досмотра в субтерагерцовом частотном диапазоне	26
<u>П. А. Гусихин, В. М. Муравьев, А. А. Фортунатов .</u> Слабозатухающие релятивистские плазменные возбуждения в двумерной электронной системе	27
<u>А. А. Деменев.</u> Субнаносекундные акустооптические переключения состояния бистабильной экситон-поляритонной системы в полупроводниковых микрорезонаторах	28
<u>А.С.Журавлев, В.Е. Кирпичев.</u> Керровское вращение в неравновесных электронных системах.....	29
<u>С. В. Зайцев.</u> Электронное комбинационное рассеяние света в недодопированном высокотемпературном сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($x = 0.7$).....	30
<u>С. В. Зайцев.</u> Субпикосекундное пространственное разделения зарядов в структурах.....	
2-типа ZnSe/BeTe при высокой плотности фотовозбуждения *	31
<u>С. В. Зайцев.</u> Оптическое детектирование циклотронного резонанса в ферромагнитных полупроводниковых гетероструктурах с дельта-слоем Mn^*	32
<u>А. М. Зарезин, В. М. Муравьев, П. А. Гусихин.</u> Наблюдение новых плазменных мод в двумерной электронной системе с близким затвором	33
<u>Б. Д. Кайсин .</u> Ферромагнитный переход в ДЭС на основе ZnO^*	34
<u>А. А. Капустин, С. И. Дорожкин.</u> Неравновесное заполнение электронных состояний под микроволновым излучением	35
<u>И. А. Карпов .</u> Повышенное пропускание микроволн слоистым метаматериалом.	36
<u>В. А. Кузнецов, Л. И. Мусина, А. С. Журавлёв.</u> Трансляционно-инвариантные комплексы магнитоэкситонов	37
<u>В.И. Кукушкин, С. Шмульт.</u> Ферми-жидкостные эффекты и перенормировка массы квазичастиц в системе двумерных электронов с сильным взаимодействием	38
<u>Я.В. Гришина, В.И. Кукушкин, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин.</u> Дополнительные резонансы гигантского усиления рамановского рассеяния света в слоистых структурах с несколькими металлическими слоями	39
<u>Л. В. Кулик, А. С. Журавлев.</u> Передача информации из объема Холловского изолятора с помощью магнетофермионного конденсата.	40
<u>Л. В. Кулик, В. Е. Кирпичев.</u> Спиновая релаксация в окрестности Холловского ферромагнитного состояния.....	42
<u>А. В. Ларионов, Л. В. Кулик.</u> Методика время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра как инструмент изучения коллективных спиновых волн в GaAs квантовых ямах с двумерным электронным газом	44
<u>М. В. Суслов, М. В. Лебедев.</u> Эффект антигруппировки фотонов как проявление влияния процесса детектирования света на источник излучения	45
<u>М. В. Лебедев .</u> Экспериментальное изучение перепутанного состояния многомодового электромагнитного поля и излучающей среды	46
<u>О. В. Мисочко.</u> Когерентные терагерцовые фононы и смешанные фонон-плазмонные моды арсенида галлия.	47
<u>В. М. Муравьев, И. В. Андреев, В. Н. Белянин .</u> Когерентный и некогерентный вклады в затухание двумерных плазменных возбуждений	48
<u>А. В. Щепетильников, А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов .</u> Анизотропия g -фактора электрона в AlAs/AlGaAs квантовых ямах.	49
<u>Ю. А. Нефёдов, А. В. Щепетильников, Д. Д. Фролов.</u> Перенормировка эффективной массы, задающей период осцилляций сопротивления гетероструктур GaAs/AlGaAs , вызванных микроволновым излучением.....	50
<u>А. Л. Парахонский, М. В. Лебедев, А. А. Дремин, И. В. Кукушкин .</u> Формирование макроскопического однородного состояния 2D электронов в режиме КЭХ.	51

Э. Степанец-Хуссейн, А. В. Ларионов. Изучение спиновых текстур в GaAs квантовых ямах с двумерным электронным газом с помощью время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра.	52
С. Н. Терешко. Особенности формирования пространственной когерентности в экситон-поляритонной системе при резонансной оптической накачке.	53
В. И. Кукушкин, Я. В. Гришина, В. В. Соловьев, И. В. Кукушкин. Комбинированный диэлектрический и плазмонный резонанс для гигантского усиления рамановского рассеяния света	54
Е. В. Филатов, А. А. Максимов, И. И. Тартаковский . Влияние внешнего электрического поля на динамику релаксации надбарьерного экситона в гетероструктурах ZnSe/BeTe	55
А. Р. Хисамеева, А. В. Щепетильников. Экспериментальные исследования плазменных возбуждений и аномального эффекта запаздывания в двумерной системе анизотропных фермионов.	56
А. Р. Хисамеева, С. И. Губарев, В. М. Муравьев. Оптическое наблюдение магнитоплазменных резонансов в непрямоугольных квантовых ямах AlAs/AlGaAs.	57
А. Р. Хисамеева, А. А. Дремин, А. А. Фортунатов, В. М. Муравьев. Оптическое детектирование магнитоплазменных возбуждений в MgZnO/ZnO гетеропереходах.	58
А. В. Черненко. Механизмы безызлучательной передачи возбуждения ионам марганца в II-VI полумагнитных квантовых точках	59
А. В. Черненко. Особенности конденсации поляритонов в микрорезонаторных микростолбиках в сильных магнитных полях.	60
А. В. Щепетильников, А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов. Спиновая динамика ядер в AlAs/AlGaAs квантовых ямах.	61
Т. Е. Голикова, Г. А. Пензяков, И. Е. Батов, D. Beckmann, В. В. Рязанов. Влияние инжекции спин-поляризованного тока и магнитного поля на дифференциальное сопротивление гибридных SNFS структур.....	62
М. А. Хитько, Л. В. Кулик, А. С. Журавлёв. Равновесная и неравновесная спиновая поляризация в окрестности фактора заполнения $3/2$	63

Магнитооптика двумерных электронных систем в структурах ZnO/MgZnO

А. Б. Ваньков**ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: vankov@issp.ac.ru*

В последние годы возник значительный интерес к исследованию свойств двумерных электронных систем (ДЭС) в высококачественных гетероструктурах ZnO/MgZnO. На основе этой гетеропары широкозонных полупроводников создаются оптоэлектронные устройства, работающие в ближнем УФ-диапазоне. С точки зрения фундаментальной науки наиболее привлекательное свойство этих систем состоит в реализации высоких кулоновских корреляций при сохранении рекордных подвижностей. В настоящей работе обсуждаются результаты первых магнитооптических экспериментов, в которых обнаружилось нетривиальное поведение ключевых характеристик ДЭС – эффективной массы, спиновой восприимчивости, энергетического спектра размерного квантования, энергии коллективных возбуждений. Методом оптически детектируемого резонансного микроволнового поглощения было обнаружено сильное возрастание циклотронной массы (от $0.28m_0$ до $0.35m_0$) при изменении концентрации ДЭС в диапазоне 10^{11} - 10^{12} см⁻². Аномальный рост циклотронной массы приписан влиянию кулоновского взаимодействия в сочетании с непараболичностью зоны проводимости [1].

Важно, что параметр Вигнера-Зейтса r_s в данном диапазоне концентраций довольно велик и меняется от 4 до 14. При этих условиях также наблюдается сильная Ферми-жидкостная перенормировка массы плотности состояний и спиновой восприимчивости. Эти и другие эффекты удастся наблюдать методом магнито-фотолюминесценции по перестройке спектра рекомбинации двумерной электронной системы. Наблюдение $1/\nu$ -периодических осцилляций сигнала фотолюминесценции позволяет точное определение концентрации двумерных электронов, а также измерение межподзонного расщепления [2]. Важным бонусом исследования магнитофотолюминесценции является возможность определения степени заполнения электронами подзон размерного квантования.

Методом неупругого рассеяния света были изучены межподзонные коллективные возбуждения зарядовой и спиновой плотности. Необычным является преобладание корреляционного сдвига в энергии зарядовых возбуждений над деполяризационным, что обусловлено величиной экситонной энергии связи. Оба энергетических вклада измерены в зависимости от параметра концентрации электронов.

Многие из перечисленных экспериментальных фактов не имеют прямой аналогии с поведением двумерных систем в традиционных структурах на основе GaAs по причине существенно большего масштаба кулоновских корреляций. Их объяснение потребует развития альтернативных теоретических подходов, не сводящихся к теории возмущений по параметру r_s .

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

- [1] V. E. Kozlov, A. B. Van'kov, I. V. Kukushkin et.al, PRB **91**, 085304 (2015).
- [2] V. V. Solov'yev, A. B. Van'kov, I. V. Kukushkin et.al, APL **106**, 082102 (2015).

Двумерные плазмоны в полупроводниковых структурах. Введение в теорию

В. А. Волков**ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11-7***e-mail: volkov.v.a@gmail.com*

Двумерные (2D) электронные системы хорошо известны и исследуются уже на протяжении нескольких десятков лет. Такие системы образуются, например, в структурах металл-диэлектрик-полупроводник, на гетерограницах, в полупроводниковых квантовых ямах, в недавно открытых двумерных материалах (графен, монослои дихалькогенидов переходных металлов и др.), а также в зоне топологических поверхностных состояний кристаллов с объемным электронным спектром типа дираковского и т.д.

В таких системах возможны коллективные колебания плазмы, образованной электронами проводимости на фоне компенсирующего положительного заряда ионов. Это может приводить к появлению бегущих волн заряда. Такие плазменные колебания и волны, как и в случае обычных (трехмерных) систем, принято называть плазмонами. Частота 2D плазменных колебаний (в отличие от 3D колебаний) существенно зависит от 2D волнового вектора, а также от плотности электронов. Это позволяет управлять частотой плазмонов с помощью изменения, соответственно, латеральных размеров образца или напряжения на затворе (в структурах типа полевого транзистора). В длинноволновом пределе, когда скорость этих волн может сравниваться со скоростью света, плазмоны описывают согласованные колебания электронов и фотонов и часто называются плазмон-поляритонами. Интерес к 2D плазмонам в полупроводниковых структурах связан, в частности, с созданием компактных быстродействующих приемников и источников терагерцового и субтерагерцового излучения, а также линий передачи информации. Для создания таких приборов необходимо знать, как свойства плазмонов зависят от размеров электронной системы. Скорость плазмонов намного превышает скорость электронов, поэтому в типичных случаях длина свободного пробега плазмонов превышает размеры образца на микрометровых (или даже сантиметровых) масштабах. Это приводит к необходимости учитывать эффекты «размерного квантования» волнового вектора и частоты плазмонов. В общем случае, нужно также знать, как влияет на свойства 2D плазмонов эффекты электромагнитного запаздывания и, в ряде важных случаев, магнитное поле.

Развитие этой области физики продолжается и в наше время. В математическом отношении указанные проблемы описываются довольно сложными уравнениями, которые решены аналитически лишь в нескольких моделях. Численные методы их решения на практике также имеют весьма ограниченную область применимости. Поэтому особое значение имеет качественный или полуквантовый анализ встречающихся проблем. Доклад посвящен краткому введению в теорию 2D плазмонов, магнитоплазмонов, плазмон-поляритонов и родственных коллективных возбуждений с упором на качественные результаты. Сформулированы также основные экспериментальные факты и затронута проблема сравнения теории и эксперимента. Прослежена логика развития этого направления от пионерской работы Ф. Стерна (1967 г.) до наших дней. Кратко обсуждены некоторые нерешенные проблемы.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-02-01226.

Пространственно-временной хаос в системе экситонных поляритонов

С. С. Гаврилов*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: gavr_ss@issp.ac.ru

Системы короткоживущих частиц, возбуждаемых внешним полем, как правило, адиабатически подчинены внешним условиям, если частицы отталкиваются друг от друга и поэтому случайные неоднородности в их распределении исчезают со временем. В частности, обычно ожидается, что в строго постоянных внешних условиях состояние подобной системы устойчиво.

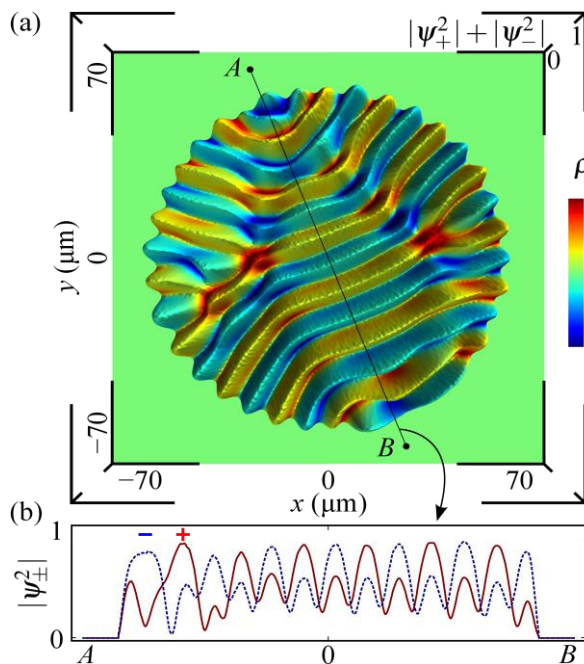


Рис. 1. Самоорганизованное распределение поля в микрорезонаторе; цвет указывает степень круговой поляризации. В зависимости от параметров возбуждения подобные структуры могут быть устойчивыми или хаотически изменяться.

В докладе сообщается о необычном поведении неравновесного конденсата экситонных поляритонов, возникающего в микрорезонаторе под действием резонансной и когерентной световой волны. Выяснилось, что в такой системе возможен пространственно-временной хаос [1]. Причина этого – спонтанное нарушение спиновой симметрии и связанная с ним высокая чувствительность к флуктуациям. Вторым необходимым элементом является распад асимметричного состояния, что приводит к бесконечной цепочке переключений спина и/или пространственной неоднородности [2]. Найденный механизм рассеяния поляритонов фундаментален и не связан с каким-либо специальным распределением потенциала в образце. Таким образом, микрорезонаторы с сильной экситон-фотонной связью могут служить источниками хаотического когерентного излучения.

Наряду с хаотической динамикой, которая возможна даже в эффективно нульмерной системе (резонаторном микростолбике), одномерная поляритонная система обнаруживает также самоорганизацию путем спонтанного разделения областей с правой и левой круговой поляризацией в форме жестко связанной периодической цепочки [3]. Если же система является двумерной, ее состояние может оказаться хаотичным в пространстве и времени. Распределение поля обнаруживает характерную нитевидную структуру (рис. 1), в которой нити (филаменты) с противоположными поляризациями чередуются между собой.

Литература

- [1] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B **94**, 195310 (2016)
- [2] S. S. Gavrilov, JETP Letters **105**, 200 (2017)
- [3] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. Lett. **120**, 033901 (2018)

Когерентность бозе-конденсата диполярных экситонов

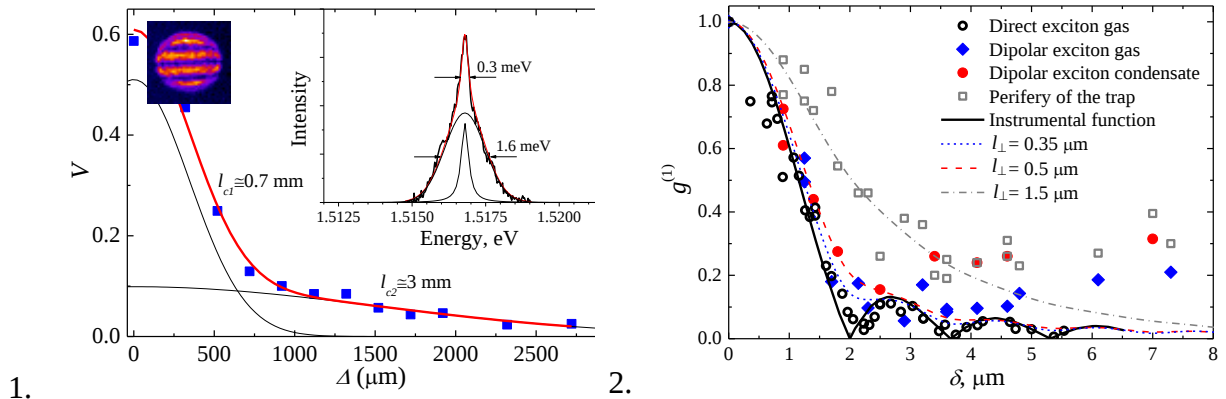
А. В. Горбунов,* В. Б. Тимофеев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: gorbunov@issp.ac.ru

Бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) остается сегодня одним из центральных направлений физики вообще и физики конденсированного состояния в частности. Продолжаются поисковые исследования по реализации БЭК в самых разнообразных бозе-системах. Теоретические предположения о возможности БЭК водородоподобных экситонов в полупроводниках появились в 60-х годах прошлого века [1,2], но экспериментальная реализация сильно затянулась по целому ряду причин.

Пространственная когерентность является одним из основных свойств бозе-эйнштейновского конденсата, который представляет собой когерентную крупномасштабную материальную волну. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований когерентности плотного ансамбля пространственно-непрямых (диполярных) экситонов в широкой одиночной GaAs/Al_xGa_{1-x}As квантовой яме [3]. Диполярные экситоны возбуждались светом в кольцевой ловушке вдоль периметра окна в шоттки-затворе на поверхности гетероструктуры. С помощью сложения амплитуд светового поля экситонной люминесценции в интерферометре Майкельсона и последующего анализа соответствующих корреляторов 1-го порядка исследована временная (Рис.1) и пространственная (Рис.2) когерентность экситонного конденсата. Установлено, что БЭК диполярных экситонов сопровождается пороговым возрастанием когерентности экситонного конденсата, как временной, так и пространственной, а поперечная длина когерентности экситонного конденсата составляет $l_{\perp} \approx 0.5$ мкм и существенно превосходит тепловую длину волны Деброяля диполярного экситона $\lambda_{dB} \sim h/\sqrt{2m_{ex}k_B T} \approx 150$ нм.



1. Рис.1. Временная когерентность. Видность V интерференционных полос для люминесценции конденсата диполярных экситонов как функция разности хода Δ в плечах интерферометра. На вставках: справа – спектр люминесценции, слева – картина интерференции. Тонкими линиями показаны результаты разложения на два контура.
2. Рис.2. Пространственная когерентность. Коррелятор $g^{(1)}$ в функции поперечной координаты δ для света люминесценции прямых экситонов, непрямых экситонов (газ или конденсат) и на периферии, вдали от ловушки. Сплошная линия – аппаратная функция, остальные – результаты конволюции с функцией $e^{-r/l_{\perp}}$ при разных длинах когерентности $l_{\perp}$.

Литература

- [1] С.А. Москаленко, ФТТ 4, 276 (1962).
- [2] J.M. Blatt, K.W. Böer, and W. Brandt, Phys. Rev. 126, 1691 (1962).
- [3] А.В. Горбунов, В.Б. Тимофеев, ФНТ 42, 438 (2016).

Динамическая структура доменов спонтанного электрического поля в индуцированном микроволновым излучением состоянии с малой диссипацией на постоянном токе

С. И. Дорожкин*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2
**e-mail: dorozh@issp.ac.ru*

Микроволновое облучение высокосоввершенных двумерных электронных систем (ДЭС) приводит к возникновению в них периодичных по обратному магнитному полю гигантских осцилляций магнетосопротивления, период которых определяется соизмеримостью энергии фотона и циклотронной энергии электронов. В минимумах таких осцилляций магнетосопротивление может стремиться к нулю, приводя к возникновению состояний с малой диссипацией, широко известных как ‘zero-resistance states’, ZRS. Если для объяснения гигантских осцилляций магнетосопротивления были предложены различные физические механизмы, фактически единственным объяснением [1] ZRS является возникновение доменной структуры спонтанного электрического поля, когда однородное состояние ДЭС под облучением становится неустойчивым и приобретает нелинейную вольт-амперную характеристику с отрицательной диссипативной проводимостью в малых полях. Экспериментальное доказательство существования доменной структуры было получено в работе [2], где были обнаружены квазипериодические переключения микроволновой фото-ЭДС между двумя разными уровнями, происходящие в номинально стационарных внешних условиях. Дальнейшие исследования показали [3], что основным содержанием эффекта переключения является изменение знака спонтанного электрического поля в доменах. В качестве механизма такой динамики спонтанного электрического поля был предложен эффект его динамического экранирования [4], например, подвижными зарядами слоя, расположенного вблизи ДЭС. В таком случае следует ожидать пропорциональности между частотой переключений электрического поля и проводимостью слоя. Наши исследования показали, что динамическая доменная структура наблюдается исключительно в гетероструктурах с конечной величиной проводимости по слою доноров, поставляющих электроны в ДЭС. Были наблюдаемы термоактивационные температурные зависимости частоты переключений и проводимости слоя легирования с близкими значениями энергии активации [5]. Такое наблюдение подтверждает базовое предсказание работы [4] и свидетельствует в пользу этой модели динамической доменной структуры. Обнаружено, что значительное понижение температуры приводит к замораживанию динамической структуры и переходу к структуре статической.

Литература

- [1] A.V. Andreev, I.L. Aleiner, and A.J. Millis, Phys. Rev. Lett. 91, 056803 (2003).
- [2] S.I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, J.H. Smet, Nat. Phys. 7, 336 (2011).
- [3] S.I. Dorozhkin, V. Umansky, L.N. Pfeiffer, K.W. West, K. Baldwin, K. von Klitzing, and J.H. Smet, Phys. Rev. Lett. 114, 176808 (2015).
- [4] I.A. Dmitriev, *International Workshop on Recent Development in 2D Systems, Okinawa, Japan, 2016*.
- [5] С.И. Дорожкин, В. Уманский, К. фон Клитцинг, Ю.Х. Смет, Письма в ЖЭТФ 107, 68 (2018).

Плазменные колебания в частично экранированной двумерной электронной системе

А. А. Заболотных,^{1,2*} В. А. Волков^{1,2}

¹*ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7*

²*Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д.9*

**e-mail: andrey.zabolotnyh@phystech.edu*

Плазменные колебания (или плазмоны) в различных двумерных (2D) электронных системах (ЭС) изучаются уже более полувека. В отличие от обычных плазменных колебаний в трёхмерных системах, в которых частота плазмона в длинноволновом пределе является константой, частота плазмонов в 2D ЭС сильно зависит от волнового вектора. А именно, в так называемом экранированном случае, т.е. когда вблизи 2D ЭС находится бесконечный металлический затвор, частота плазмона зависит от волнового вектора линейно [1], при этом характерная скорость плазмонов зависит от расстояния между затвором и 2D ЭС; если же 2D ЭС помещена в бесконечный диэлектрик с постоянной диэлектрической проницаемостью, то говорят о неэкранированном плазмоне, частота которого зависит от волнового вектора корневым образом [2].

В данной работе найден спектр плазмонов в бесконечной 2D ЭС, вблизи которой находится металлический затвор в виде полосы конечной ширины [3], при этом считалось, что напряжение на затворе отсутствует, т.е. 2D ЭС является однородной. Оказалось, что задача имеет аналитическое решение, если использовать два разумных приближения: расстояние до затвора много меньше длины волны плазмона и ширины затвора; частота искомого плазмона много меньше частоты неэкранированных плазмонов, существующих вдали от затвора, при том же значении волнового вектора.

Получено, что в такой системе существуют плазмоны, локализованные вблизи затвора и распространяющиеся вдоль него. Оказалось, что частота таких плазмонов определяется волновым вектором вдоль затвора и номером моды N , который соответствует числу нулей плотности заряда поперёк металлического затвора. Высокие моды $N=1, 2, \dots$, были известны ранее из численных расчётов, однако основная мода $N=0$ рассмотрена впервые. Показано, что эта мода в длинноволновом пределе имеет необычный спектр, сочетающий в себе черты спектров экранированного и неэкранированного плазмонов. Также рассчитаны плотности заряда, поля и токи полученных мод, обсуждается влияние постоянного внешнего магнитного поля, перпендикулярного 2D ЭС.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-02-01226.

Литература

- [1] А.В. Чаплик, ЖЭТФ, 62, 746 (1972).
- [2] F. Stern, Phys. Rev. Lett. 18, 546 (1967).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).

Генерация терагерцового излучения диполярными экситонными поляритонами в GaAs микрорезонаторах

A. Seedhouse,¹ J. Wilkes,¹ E. A. Muljarov,¹ **В. Д. Кулаковский**^{2*}

¹*School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, United Kingdom*

²*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*

*e-mail: kulakovs@issp.ac.ru

Генерация терагерцового (ТГц) излучения является одной из основных технологических проблем в настоящее время. Область применения ТГц источников распространяется от безопасности до медицины и коммуникационных технологий. Существующие ТГц излучатели основаны на большом разнообразии физических принципов: твердотельные генераторы на основе эффекта Ганна, квантовые каскадные лазеры, лазерные излучатели, в которых фемтосекундные оптические импульсы возбуждают колебания плотности носителей в полупроводниковых структурах, источники на основе свободных электронов, бозонные каскадные лазеры на основе экситонных переходов в микрорезонаторах (МР), и т.д. [1]. Однако оптимизация спектральных характеристик, размеров, эффективности, стоимости и рабочей температуры ТГц устройств остается одной из приоритетных задач оптоэлектроники.

Мы предлагаем компактный преобразователь оптического излучения в ТГц на основе высокодобротного полупроводникового МР с набором двойных квантовых ям (ДКЯ) в активной области. В таких МР возможно формирование диполяритонов – связанных состояний фотонной МР моды и диэкситонов с разделенными в соседних КЯ электроном и дыркой, обладающих большим дипольным моментом.

Генерация ТГц излучения достигается за счет резонансного возбуждения диполяритонов двумя лазерными лучами с разностью частот в ТГц диапазоне. Интерференция диполяритонных систем приводит к колебаниям плотности диполяритонов и, как следствие, их дипольного момента на частоте расстройки, генерируя, таким образом, ТГц излучение. Мы оптимизировали параметры МР с 4-мя ДКЯ GaAs/AlGaAs, и показали, что интенсивность ТГц излучения максимальна, когда частоты двух лазеров соответствуют различным состояниям диполяритона. Энергетический зазор между ними можно контролировать с помощью внешнего электрического поля (рис.1).

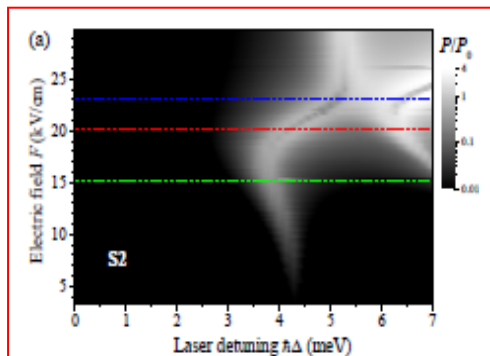


Рис. 1. Зависимость интенсивности ТГц излучения МР с системой ДКЯ (6-3-7 нм) от частоты излучения Δ и электрического поля F для МР моды 1574 мЭВ. ($P_0=0.8$ мВт) Частота одного лазера равна энергии основного состояния диполяритона.

При размере излучателя 0.1×0.1 мм и плотности диэкситонов $5 \cdot 10^{10} / \text{см}^2$ в одной ДКЯ мощность ТГц излучения P ($\Delta = 1$ ТГц) = 3.2 мВт, потери вследствие излучения диполяритонов в МР с добротностью 7000 при этом составляют ~ 3.2 Вт, т. е. коэффициент преобразования $\eta \sim 0.1\%$.

Работа выполнена при частичной поддержке Cardiff Undergraduated Research Opportunities Programme.

Литература

- [1] P. Siegel, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 50, 910 (2002), H. Eisele, et al, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 48, 626 (2000), J. Faist, et al, Science 264, 553 (1994), S. H. Gold and G. S. Nusinovich, Review of Scientific Instruments 68, 3945 (1997), T. C. H. Liew, et al, Phys. Rev. Lett. 110, 047402 (2013).

Применение рамановской спектроскопии в области контроля безопасности лекарственных препаратов

Л. В. Кулик

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Сложность идентификации лекарственных растворов в ходе сертификации, контроля контрафактной продукции, проверки подлинности входящих ингредиентов и аналогичных процедур заключается, главным образом, в необходимости осуществлять контрольные тесты в массовом порядке в установленные контролируемыми органами временные сроки. С помощью стандартного метода хромато-масс-спектрометрии подобные процедуры практически невозможно осуществлять массово из-за сложностей самого метода, отсутствия портативной реализации, необходимости подготовки образцов для анализа, присутствия квалифицированного оператора. Для хромато-масс-спектрометрии требуется вскрытие ампул с растворами, для чего необходимы соответствующие разрешения компаний-производителей лекарственных препаратов. Использование инновационных методов рамановской спектроскопии устраняет указанные недостатки. Рамановская спектроскопия является активно развивающейся методикой неразрушающего контроля состава твердых и жидких веществ, позволяющей анализировать жидкости и сыпучие смеси сквозь прозрачные и полупрозрачные оболочки без повреждения последних, проводить идентификацию отдельных веществ и их смесей в течение нескольких секунд.



Рис. 1. Рамановский спектр однопроцентного раствора фуросемида в воде. Точность определения процентного состава фуросемида составляет менее 0.1%.

Основной сложностью количественного анализа состава жидких лекарственных препаратов рамановским методом является то, что основным растворителем является вода, трудно идентифицируемая с помощью стандартных портативных рамановских методик. Обсуждаются экспериментальные результаты анализа слабых рамановских сигналов активных лекарственных веществ, доля которых в водных растворах составляет менее одного процента, выполненных на специально спроектированном портативном рамановском спектрометре без вскрытия содержащей вещество упаковки, с высокой точностью (рис.1). Для достижения заявленных характеристик были проведены исследования, посвященные установлению спектрального положения и интенсивности линий воды в зависимости от pH раствора, влиянию люминесцентных и рамановских сигналов от стеклянных упаковок на спектр исследуемого раствора, химическому сдвигу линий активного вещества в растворе в зависимости от концентраций воды и растворенных веществ. В результате была разработана оригинальная методика разделения спектров отдельных компонент раствора и установления процентного содержания основного и добавочных веществ. Предлагаемая методика прошла апробацию в специализированных лабораториях федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения, где были подтверждены все заявленные характеристики методики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003)

Циркулярно-поляризованное излучение света в искусственно созданных хиральных полупроводниковых наноструктурах

А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, Е. В. Филатов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Полупроводниковые технологии в настоящее время позволяют создавать искусственные метаматериалы: фотонные кристаллы, микрорезонаторы, волноводные структуры, оптическая активность которых может значительно превышать оптическую активность естественных хиральных материалов. Излучение таких структур, его интенсивность, направленность и степень поляризации зависит от локальной плотности электромагнитных мод в самой структуре, которой можно управлять на стадии изготовления. Наноструктуры на основе обычных ахиральных A^3B^5 полупроводников, в которых неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод возникает из-за общей хиральной симметрии системы, могут быть использованы для создания компактных источников циркулярно-поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля.

Экспериментально подробно исследованы спектральные, поляризационные и пространственные свойства излучения слоя $InAs$ квантовых точек, внедренных в высокодобротные микрорезонаторы на основе $GaAs$. На верхнем Брэгговском зеркале микрорезонаторов при травлении на часть его высоты изготавливались структуры, представляющие собой квадратные решетки фотонных кристаллов из периодически расположенных либо правых и левых гаммадионов, либо Z - и S -подобных фигур, либо 4-х вытянутых прямоугольников, повернутых на 90° относительно друг друга. Кроме того, исследовались планарные $GaAs$ волноводы с верхним слоем структуры, который также представлял собой квадратную решетку хирального фотонного кристалла. В таких структурах исследовались излучение одиночных квантовых точек, дисперсия фотонных мод при анализе углового распределения излучения, продемонстрировано, что степень циркулярной поляризации полос излучения фотолюминесценции может достигать значений очень близких к 1 в нулевом магнитном поле.

Также исследовано циркулярно-поляризованное излучение полупроводникового поляритонного лазера с электрической накачкой. Были изготовлены и исследованы лазерные структуры на основе $Al_{0.40}Ga_{0.60}As$ микрорезонатора, в центре которого в пучности электрического поля расположены четыре $GaAs$ квантовые ямы шириной 7 нм. Нижнее брэгговское зеркало микрорезонатора допировалось кремнием, а верхнее углеродом. Отдельный лазер представлял собой параллелепипед с основанием размером $60 \times 60 \text{ мкм}^2$. На верхнем зеркале такого лазера внутри площади, ограниченной золотым кольцевым контактом, размещался фотонный кристалл размером $36 \times 36 \text{ мкм}^2$, который был образован за счет вытравливания на определенную глубину микростолбиков. Элементарная ячейка фотонного кристалла с периодом 880 нм состояла из микростолбиков с основаниями в виде 4-х вытянутых прямоугольников с соотношением сторон 1:2 и повернутых на 90° влево или вправо относительно друг друга. К лазеру прикладывалось импульсное напряжение до 75 В длительностью $\sim 1 \text{ мкс}$ с частотой следования 10 – 100 кГц. При увеличении импульсного тока I , текущего через образец, линейная зависимость интенсивности линии излучения сменялась ее резким сверхлинейным ростом ($\sim I^{11}$). При этом наблюдались также спектральный сдвиг линии генерации лазера на величину $\sim 1.5 \text{ мэВ}$ и сужение ее углового пространственного распределения до $\sim 1.5 - 2^\circ$. Спектральная ширина линии лазерной генерации уменьшалась до величин $\sim 40 \text{ мэВ}$, а степень ее циркулярной поляризации могла достигать величин более 60 %.

Работа частично поддержана проектами РФФИ № 19-02-00697.

Новые плазменные возбуждения в двумерных электронных системах

В. М. Муравьев, * П. А. Гусихин, И. В. Андреев, С. И. Губарев*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: muravev@issp.ac.ru*

Задача распространения электромагнитных волн вдоль металлического провода была решена более 100 лет тому назад Зоммерфельдом [1]. В его работах было показано, что электромагнитная волна вдоль провода распространяется со скоростью света. Именно посредством этих плазмон-поляритонных волн переменный сигнал передается вдоль современных линий электропередач.

В настоящих экспериментах было обнаружено, что в гибридной системе, состоящей из металлического затвора, помещенного рядом с двумерной электронной системой (ДЭС) возникает новое семейство плазменных возбуждений [2, 3, 4]. Показано, что новые плазменные волны распространяются вдоль затвора и не имеют потенциальных узлов в перпендикулярном направлении. Установлено, что новые плазменные волны обладают уникальной дисперсией, отличающейся от случая 2Д плазмонов как в системе с бесконечным экранирующим затвором, так и в системе без затвора

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2n_S e^2 h}{m^* \epsilon \epsilon_0} \frac{q}{W}} \quad (qW \ll 1),$$

где q – волновой вектор вдоль полоски затвора с шириной W , n_S – двумерная электронная концентрация, h – расстояние от ДЭС до затвора, m^* и e – эффективная масса и заряд носителей заряда. В экспериментах было обнаружено, что открытая плазменная мода имеет особый характер гибридизации со световыми волнами. Образующаяся при этом плазмон-поляритонная волна обладает аномально малым затуханием. Это свойство делает возможным наблюдение новой плазменной моды вплоть до комнатной температуры [4].

Новые плазменные возбуждения, возникающие в гибридной системе ДЭС с близким затвором, были исследованы в различных геометриях образца. В частности, была подробно исследована геометрия с отверстием в затворе в форме диска. Показано, что в такой геометрии новая плазменная мода обладает целым рядом уникальных физических свойств. Во-первых, зависимость частоты плазменной моды от обратной ширины носит не корневой характер. Во-вторых, в геометрии диска удастся возбудить целый ряд кратных гармоник. По поведению которых удастся судить о физической природе гибридизации со светом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003)

Литература

- [1] A. Sommerfeld, *Annalen der Physik*, **303**, 233 (1899).
- [2] A.A. Zabolotnykh, V.A. Volkov, *Phys. Rev. B* (2019).
- [3] V.M. Muravev, et al., submitted to *Phys. Rev. Lett.* (2019).
- [4] V.M. Muravev, et al., *Phys. Rev. Lett.* **121**, 176804 (2018).

Размерный плазмон-поляритонный резонанс и его вклад в гигантское усиление рамановского рассеяния света

В. И. Кукушкин,^{1,2*} Я. В. Гришина,¹ В. В. Соловьев,¹ И. В. Кукушкин¹

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

²Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И.И.Мечникова, 105064 Москва, Россия

*e-mail: kukush@issp.ac.ru

В структурах с пространственной модуляцией высоты и латеральных размеров диэлектрика, покрытого толстым металлическим слоем (10-80 нм), измерена зависимость коэффициента усиления рамановского рассеяния света от размера диэлектрического столбика. Установлено, что в случае толстого металлического покрытия (использовались серебряное, золотое и медное покрытия) при размерах диэлектрического столбика, близких к длине волны лазерной накачки, наблюдается значительное усиление рамановского сигнала, осциллирующее при вариации геометрических размеров структуры. Показано, что наблюдаемое резонансное усиление рамановского сигнала связано с преобразованием электромагнитного излучения в локализованные плазмон-поляритонные моды, и эффективность такого преобразования определяется соизмеримостью длины волны плазмон-поляритонной моды и планарным размером металлической пленки. Для различных металлических покрытий измерена зависимость коэффициента усиления рамановского рассеяния света от длины волны излучения лазера.

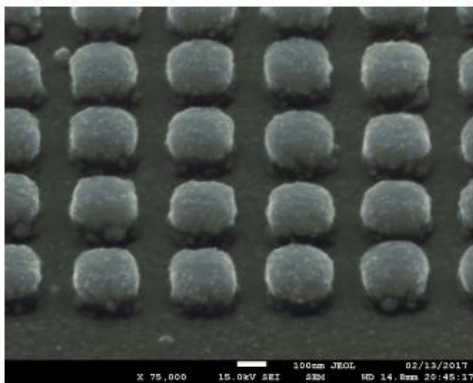


Рис.1. Фотографии структур с диэлектрическими столбиками с серебряным покрытием толщиной 40 нм. Высота столбиков 130 нм.

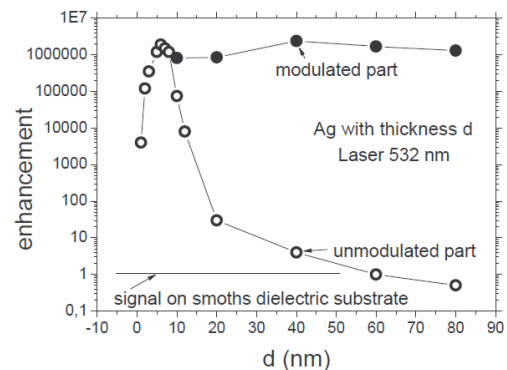


Рис.2. Зависимости коэффициента гигантского рамановского рассеяния света от толщины серебряного покрытия измеренные на гладкой части структуры (полые символы) и на модулированной части структуры с максимальным рамановским сигналом (сплошные символы).

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003)

Спиновая динамика ионов Mn^{2+} при фотовозбуждении наноструктур на основе A^2B^6 полупроводников во внешних магнитных полях

А. А. Максимов, И. И. Тартаковский, Е. В. Филатов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Характерные времена взаимодействий, которые определяют спиновую динамику магнитных ионов в полумагнитных A^2B^6 полупроводниковых наноструктурах, могут меняться от пикосекунд (субпикосекунд) как в случае электрон-фононного или *sp-d* обменного взаимодействия свободных носителей с локализованными магнитными моментами ионов Mn^{2+} , до миллисекунд в случае спин-решеточной релаксации в сильно разбавленных полумагнитных полупроводниках. С помощью развитой полностью оптической методики исследована кинетика намагниченности ионов Mn при низких температурах во внешних магнитных полях во всем интересующем интервале времен. Экспериментально наблюдается очень сильная зависимость времени спин-решеточной релаксации (релаксации намагниченности) в II-VI полумагнитных полупроводниках и наноструктурах на их основе от концентрации ионов Mn. При увеличении концентрации Mn от 0.4% до 15% эти времена изменяются более чем на 5 порядков величины от миллисекунд до наносекунд. Характерно, что наиболее резкая зависимость наблюдается в диапазоне концентраций $>2\%$.

Важно заметить, что время релаксации намагниченности определяется не только временем спин-решеточной релаксации, но и процессами спиновой диффузии. До некоторой степени можно считать, что время релаксации намагниченности просто совпадает со временем спин-решеточной релаксации лишь в полумагнитных полупроводниковых структурах с однородной концентрацией Mn. Однако, даже в этом случае, необходимо учитывать миграцию спиновых возбуждений (спиновую диффузию) от одиночных ионов Mn к более сложным кластерам, содержащим несколько ионов, расположенных в соседних узлах решетки. При этом роль марганцевых кластеров, которые выступают как центры быстрой спин-решеточной релаксации в полумагнитных полупроводниках, становится чрезвычайно важной, поскольку спиновая релаксация изолированного иона Mn практически отсутствует.

Существует два пути для передачи энергии и спина от фотовозбужденных носителей к магнитной подсистеме полумагнитных II-VI полупроводников. Прямой путь – через обменное взаимодействие горячих носителей с локализованными спинами ионов Mn, характеризующееся короткими временами элементарных актов этого взаимодействия τ_{e-Mn} , лежащими в пикосекундной области. Непрямой путь – через испускание неравновесных фононов при релаксации носителей с также короткими временами τ_{e-L} и последующим процессом спин-решеточной релаксации с обычно более длинными временами τ_{SLR} . Экспериментально определить разную эффективность этих процессов, определяемых отношением времен τ_{e-Mn} и τ_{e-L} , непросто. Даже наблюдение при возбуждении длинными оптическими импульсами времен нагрева марганцевой подсистемы, совпадающих с τ_{SLR} , не может свидетельствовать однозначно в пользу доминирования непрямого пути. Оптическое возбуждение мощными импульсами лазеров наносекундной и пикосекундной длительности показало, что в квантовых ямах на основе (Zn,Mn)Se всегда доминируют процессы прямой передачи энергии от фотовозбужденных носителей в магнитную подсистему. Были выполнены прямые измерения времен пикосекундной кинетики процессов передачи энергии и спина фотовозбужденных носителей за счет обменного взаимодействия с локализованными спинами ионов Mn^{2+} в полумагнитных полупроводниковых гетероструктурах второго типа на основе (Zn,Mn)Se/(Be,Mn)Te.

Работа частично поддержана проектом РФФИ № 17-02-00959.

Корреляции интенсивности люминесценции в условиях экситонной бозе-конденсации

А. В. Горбунов,* В. Б. Тимофеев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: gorbunov@issp.ac.ru

Бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) лежит в основе таких ярких, необычных явлений, как сверхтекучесть в жидком гелии и сверхпроводимость в металлах. Очевидно, что осуществление БЭК в новых материалах может привести к открытию и развитию новых практически важных приложений. Не случайно, что поисковые исследования по реализации БЭК сегодня активно продолжаются в самых разнообразных бозе-системах. Теоретические исследования относительно возможности БЭК экситонов в полупроводниках были начаты еще в 60-х годах прошлого века [1,2], но попытки экспериментальной реализации столкнулись с целым рядом проблем [3].

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований корреляций интенсивности люминесценции в условиях БЭК пространственно-непрямых дипольных экситонов в широкой GaAs/Al_xGa_{1-x}As квантовой яме при накоплении их в кольцевой ловушке вдоль периметра окна в затворе Шоттки. В окрестности порога БЭК, который устанавливался по появлению в спектре люминесценции узкой линии экситонного конденсата при наращивании оптической накачки (Рис.1) обнаружена группировка фотонов (Рис.2). Если предположить, что люминесценция дипольных экситонов прямым образом передает когерентные свойства экситонного газа, то обнаруженный эффект также свидетельствует о фазовом переходе и является независимым способом детектирования экситонной БЭК.

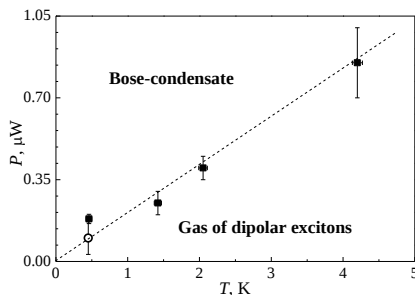


Рис.1. Фазовая диаграмма БЭК дипольных экситонов в кольцевой ловушке в координатах « $P - T$ ». Квадраты отвечают порогу БЭК, найденному по появлению узкой линии в спектре экситонной люминесценции. Кругом при температуре $T = 0.45$ К показан порог БЭК, оцененный по положению максимума коррелятора $g^{(2)}(\tau = 0)$ в функции мощности накачки P .

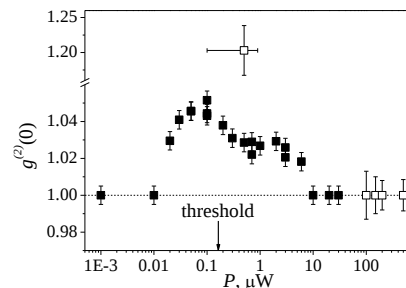


Рис.2. Зависимость от мощности накачки P коррелятора $g^{(2)}(\tau = 0)$ для света люминесценции дипольных экситонов в кольцевой ловушке $\varnothing 5$ мкм. Черные и светлые квадраты – результаты измерений с «медленными» и «быстрыми» детекторами, соответственно. Стрелкой указан порог БЭК в соответствии с фазовой диаграммой на Рис.1. $T = 0.45$ К.

Литература

- [1] С.А. Москаленко, ФТТ 4, 276 (1962).
- [2] J.M. Blatt, K.W. Böer, and W. Brandt, Phys. Rev. 126, 1691 (1962).
- [3] David Snoke and G.M. Kavoulakis, Rep. Prog. Phys. 77, 116501 (2014).
- [4] А.В. Горбунов, В.Б. Тимофеев, Письма в ЖЭТФ 96, 145 (2012).

Реализация сверхпроводниковых однокубитных и двухкубитных квантовых вентилей как основы квантовых процессоров.

В. В. Рязанов*

*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2
e-mail: valery.ryazanov@gmail.com

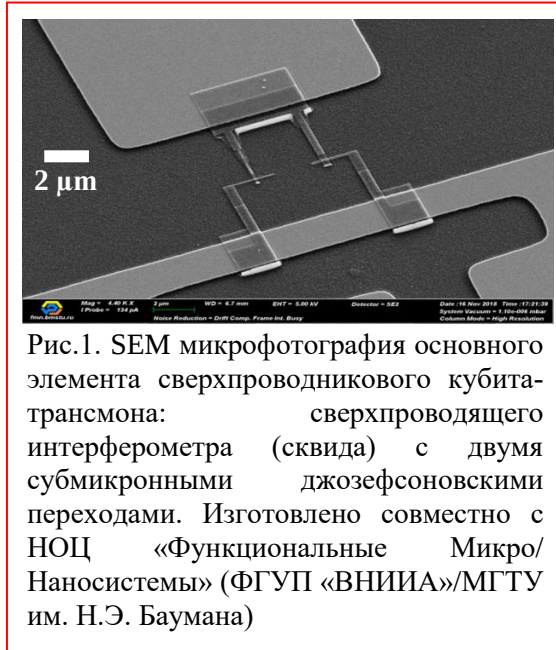


Рис.1. SEM микрофотография основного элемента сверхпроводникового кубита-трансмона: сверхпроводящего интерферометра (сквида) с двумя субмикронными джозефсоновскими переходами. Изготовлено совместно с НОЦ «Функциональные Микро/Наносистемы» (ФГУП «ВНИИА»/МГТУ им. Н.Э. Баумана)

В рамках трехлетнего проекта Фонда перспективных исследований «Развитие квантовых технологий вычислений на основе сверхпроводящих цепей и структур» ИФТТ РАН участвует в работах по реализации универсального набора квантовых гейтов (вентилей), которые являются основой квантового процессора.

В докладе представлены различные типы сверхпроводниковых кубитов, однокубитные и двухкубитные системы, разработанные и исследованные совместно с другими соисполнителями проекта: МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИТУ «МИСиС», Российский квантовый центр, НГТУ, ВНИИА им. Н.Л. Духова [1].

Преимущество сверхпроводниковых кубитов перед кубитами на основе других квантовых объектов (нейтральных атомов в

оптических ловушках, ионов в электромагнитных ловушках и др.) связано с тем, что они изготавливаются стандартными методами современной нанoeлектроники. Разработка основ технологии джозефсоновских структур, микроволновых сверхпроводящих линий и копланарных резонаторов выполнялась в технологических зонах ИФТТ РАН, МФТИ и МИСиС с последующей передачей для дальнейшего развития и воспроизводимого тиражирования в Технологический Центр ВНИИА/МГТУ. Основными элементами сверхпроводящих кубитов являются джозефсоновские туннельные (SIS) переходы $\text{Al}-\text{AlO}_x-\text{Al}$ субмикронных размеров (Рис. 1). Для достижения заданного квантового состояния кубита используется приложение микроволновых импульсов с частотой кубита, а считывание состояния – с помощью «on-chip» копланарного резонатора. Важнейшей проблемой при реализации сверхпроводящих кубитов («искусственных атомов на подложке») является увеличение времени когерентных процессов в кубитах. В течение трех лет реализации проекта достигнуты времена когерентности, составляющие десятки микросекунд, при типичном времени выполнения двухкубитной операции 0.2 мкс, что позволяет реализовать разработанные в настоящее время квантовые алгоритмы на двухкубитных и многокубитных системах. В докладе представлена реализация однокубитных квантовых вентильных операций (гейтов NOT и Hadamard) и двухкубитных гейтов (CNOT, CPhase, iSWAP). Это полный набор необходимых квантовых вентильных операций, который позволяет выполнять любой из известных квантовых алгоритмов, в частности алгоритм Гровера поиска в базе данных.

Литература

[1] И.С. Беседин, Г.П. Федоров, А.Ю. Дмитриев, В.В. Рязанов, Разработка сверхпроводящих кубитов в России, Квантовая электроника **48** (№ 10), 879 (2018)

Индукцированные микроволновым излучением осцилляции сопротивления в ZnO/MgZnO гетеропереходах

А. В. Щепетильников,* А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru*

Явление индуцированных микроволновым излучением осцилляций продольного сопротивления двумерной электронной системы было изучено в ZnO/MgZnO, гетеропереходах. Системы двумерных электронов, формирующиеся в таких структурах,

отличаются рядом уникальных свойств. Например, эффективная масса электрона в них значительно превышает массу электрона в GaAs. Такая большая эффективная масса приводит к доминированию энергии электрон-электронного взаимодействия над кинетической, а значит, и к значительному возрастанию роли многочастичных эффектов и существенному изменению основных физических свойств такой системы.

Осцилляции были обнаружены как на образцах, выполненных в виде мостика Холла, так и диска Корбино. При этом, по меньшей мере, четыре первые осцилляции можно было отчетливо разрешить (см. рис.1). Фаза была измерена для всех осцилляций кроме первой и составляла $\frac{1}{4}$, что совпадает с числом, полученным для

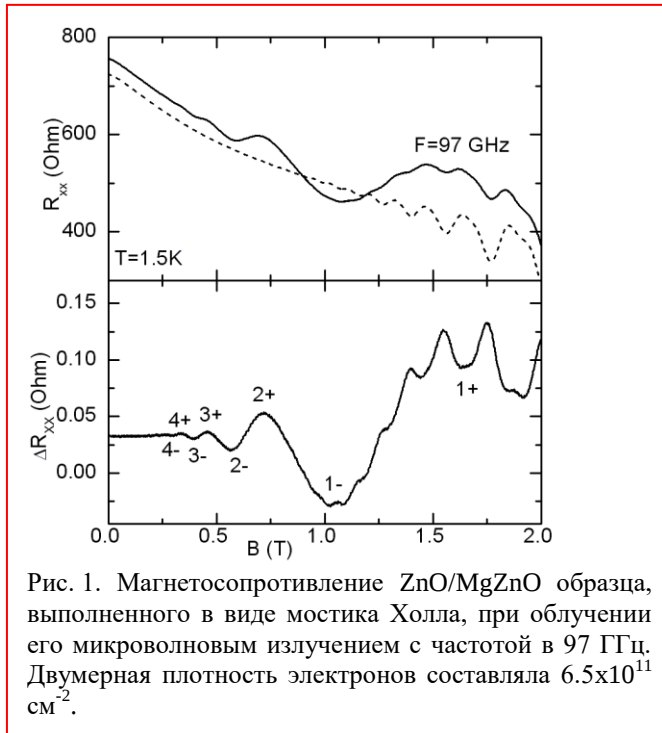


Рис. 1. Магнетосопротивление ZnO/MgZnO образца, выполненного в виде мостика Холла, при облучении его микроволновым излучением с частотой в 97 ГГц. Двумерная плотность электронов составляла $6.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

стандартных GaAs/AlGaAs гетероструктур. По зависимости периода осцилляций от магнитного поля была определена эффективная масса электрона в ZnO/MgZnO гетеропереходах с различной электронной плотностью. Оказалось, что эта масса зависит от электронной концентрации n : при $n = 6.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ масса составляла $0.355m_0$ (m_0 - масса свободного электрона) и уменьшается с ростом n в исследованном диапазоне концентраций (от $4.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до $2.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

Осесимметричные магнитоплазменные возбуждения в двумерных электронных системах

И. В. Андреев, А. А. Фортунатов, А. А. Дрёмин

ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Собственные плазменные колебания в образцах двумерных электронных систем (ДЭС) в форме дисков можно классифицировать при помощи радиального $l = 0, 1, 2 \dots$ и магнитного $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ волновых чисел [1]. Моды с $m=0$ являются осесимметричными и представляют специальный физический интерес. Вследствие аксиальной симметрии распределения заряда в данных модах, они обладают нулевым дипольным моментом, и их излучательный распад должен быть дипольно запрещён. За счёт этого время жизни таких мод больше, чем для фундаментальной моды в диске.

В данной работе удалось успешно возбудить и исследовать осесимметричные магнитоплазменные моды в дисках ДЭС, изготовленных из высокоподвижных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. Для возбуждения использовались две ближнепольные методики: в геометрии квази-Корбино при помощи маленького дискообразного затвора, расположенного в центре образца (см. вставку к рис. 1) [2], и в волноводе при возмущении микроволнового поля внесённым в него диэлектрическим дефектом [3]. Детектирование микроволнового поглощения осуществлялось при помощи оптической методики [4].

В эксперименте была исследована дисперсия и магнитодисперсия осесимметричных мод, проведено качественное и количественное сравнение магнитодисперсий осесимметричной и фундаментальной мод в образцах одинакового диаметра. Проведено сравнение двух методик возбуждения осесимметричных мод. Также были исследованы проявления релятивистских эффектов запаздывания для осесимметричной моды, показано, что они существенно слабее, чем для фундаментальной магнитоплазменной моды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН.

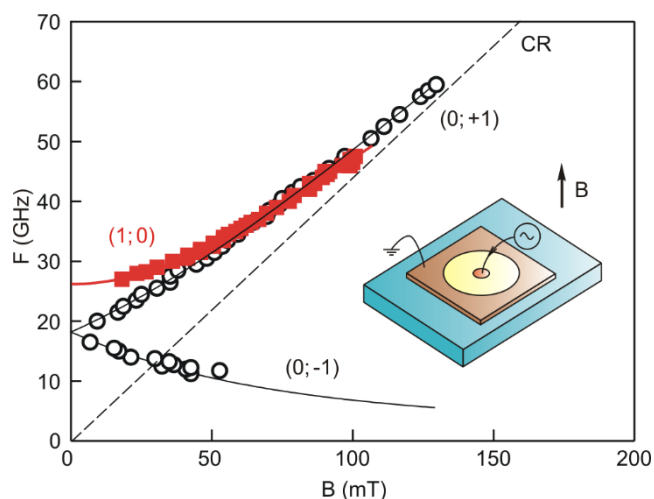


Рис. 1. Сравнение магнитодисперсий осесимметричной (1; 0) и фундаментальной (0; ±1) магнитоплазменных мод в образцах одинакового диаметра. На вставке приведено схематическое изображение образца в геометрии квази-Корбино, использованной для возбуждения осесимметричных мод

Литература

- [1] С.С. Назин и В.Б. Шикин, ФНТ 15, 277 (1989).
- [2] V.M. Muravev, I.V. Andreev, V.N. Belyanin, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 96, 045421 (2017).
- [3] А.А. Загитова, В.М. Муравьев, П.А. Гусихин, А.А. Фортунатов, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 108, 478 (2018).
- [4] B.M. Ashkinadze, E. Linder, E. Cohen, and Arza Ron, Phys. Status Solidi 164, 231 (1997).

Тонкая структура циклотронного резонанса в двумерных электронных системах

В. Н. Белянин, И. В. Андреев, В. М. Муравьёв

ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

В двумерных электронных системах (ДЭС) конечного размера наблюдение циклотронного резонанса в чистом виде, как правило, невозможно из-за его гибридизации с плазменными возбуждениями, приводящей к появлению магнитоплазмонов. Однако, недавно было установлено [1], что в некоторых случаях в ДЭС возможно наблюдение «чистого», негибридизованного циклотронного резонанса.

В настоящей работе исследованы спектры микроволнового поглощения ДЭС в широком диапазоне частот (10-250 ГГц) в магнитном поле. В качестве образцов использовались диски ДЭС, выращенные из высокоподвижных гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами. Микроволновое возбуждение ДЭС осуществлялось свободно распространяющейся волной в волноводе. Для детектирования микроволнового поглощения использовалась оптическая методика, основанная на высокой чувствительности формы линии рекомбинантной люминесценции двумерных электронов к разогреву ДЭС [2].

Экспериментально обнаружено, что кратные гармоники магнитоплазменного резонанса пересекают циклотронную магнитодисперсию, при этом гребёнка магнитоплазменных резонансов имеет общую огибающую, положение центра которой точно соответствует одночастичному циклотронному резонансу. Из эксперимента следует, что ширина отдельных магнитоплазменных гармоник определяется столкновительным, а ширина огибающей – излучательным механизмом затухания. Такая «тонкая структура» линии циклотронного резонанса наблюдается при одновременном выполнении двух условий: $2\pi\sigma_{xx}(B=0) > c$ и $2\pi\sigma_{xy}(B) > c$, где $\sigma_{\alpha\beta}$ – тензор двумерной магнитопроводимости, являющийся функцией внешнего магнитного поля (в единицах СГС). Экспериментально установлено, что ширина огибающей линейно растёт с увеличением концентрации двумерных электронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН.

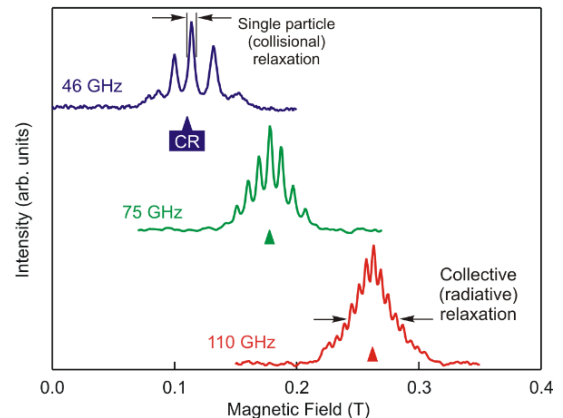


Рис. 1. Кривые интенсивности микроволнового поглощения от магнитного поля для трёх частот микроволнового возбуждения в диске диаметром 2.5 мм с электронной концентрацией $1.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Видна «тонкая структура» циклотронного резонанса. Ширина отдельных магнитоплазменных пиков определяется столкновительным, а общей огибающей – излучательным механизмом затухания. Точное положение циклотронного резонанса отмечено стрелочками.

Литература

- [1] V.M. Muravev, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, V.N. Belyanin, I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 93, 041110(R) (2016).
- [2] B.M. Ashkinadze, E. Linder, E. Cohen, and Arza Ron, Phys. Status Solidi 164, 231 (1997).

**Возбуждения зарядовой и спиновой плотности
в двойных электронных слоях с управляемой симметрией
в сильном магнитном поле**

В. Е. Бисти*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: bisti@issp.ac.ru

Системы с двойными электронными слоями представляют значительный интерес как область для изучения фундаментальных проблем физики твердого тела. Экспериментальная возможность изменения пространственной симметрии двуслойных систем со слабой туннельной связью явилась стимулом для обращения к теоретическим аспектам этой проблемы. В существующих экспериментах симметрия системы перестраивается при изменении концентраций ионизованных доноров по обе стороны от двумерной структуры посредством дополнительного облучения лазером с энергией фотона, превышающей ширину запрещенной зоны в барьере. Электрическое поле, создаваемое ионизованными донорами, влияет на профиль ограничивающего потенциала двойной квантовой ямы. При слабой туннельной связи между слоями задачу удобно рассматривать методом туннельного гамильтониана. Рассматривается такая суммарная концентрация двумерных электронов, что заполнены только две подзоны размерного квантования, остальные подзоны расположены много выше по энергии и не учитываются. Энергии электронов в двух нижайших подзонах $E_{1,2} = E_0 \pm \sqrt{\Delta_E^2 + \Delta_{SAS}^2}$. Δ_E - параметр асимметрии, определяемый концентрацией ионизованных доноров, Δ_{SAS} - параметр туннелирования. При $\Delta_{SAS} \ll \Delta_E$ имеются два независимых слоя, при $\Delta_E \ll \Delta_{SAS}$ - две подзоны с симметричной и асимметричной волновыми функциями. Изучается влияние пространственной симметрии на возбуждения зарядовой (CD) и спиновой (SD) плотности в двуслойных электронных системах со слабым туннелированием в сильном магнитном поле (циклотронная энергия много больше кулоновской) при факторе заполнения 4 (заполнены оба спиновых уровня каждой из подзон, все электроны находятся на нижайшем уровне Ландау). Показано, что существует 4 возбуждения каждого типа (CD или SD). Одно из них (для CD это оптический магнитоплазмон) не зависит от симметрии системы, в то время как энергии трех других возбуждений определяются параметрами асимметрии, туннелирования и разностью энергий внутриямного и межъямного магнитоэкситонов и при определенных соотношениях между этими величинами могут нести информацию о симметрии системы. Зависимость от экспериментально изменяемого параметра Δ_E может быть обнаружена при малых k методом неупругого рассеяния света.

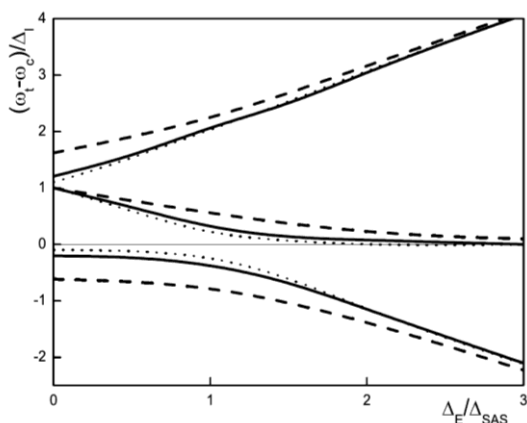


Рис. 1. Зависимость относительных энергий изоспинового триплета от параметра асимметрии при значениях 1(пунктир), 2(сплошная), 3(точки).

Фотолюминесценция экситонов и трионов в связанных квантовых ямах с монослоями $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$

А. С. Бричкин*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: brich@issp.ac.ru*

Гетероструктуры на основе монослоёв дихалькогенидов переходных металлов являются перспективными объектами исследований и привлекают повышенное внимание последние несколько лет. Это связано с тем, что экситоны в таких структурах обладают большой энергией связи, и остаются стабильными даже при комнатной температуре, что является ключевым требованием для развития экситонных технологий [1]. Серьёзным препятствием для исследований оптических свойств таких гетероструктур является большая ширина линии экситона (10-100 мэВ), что связано с флуктуациями случайного потенциала. В данной работе представлены результаты измерения фотолюминесценции (ФЛ) экситонов и трионов в структурах $\text{hBN-MoSe}_2\text{-WSe}_2\text{-hBN}$ с монослоями MoSe_2 и WSe_2 при температуре от 2 до 295 К при возбуждении непрерывным лазером с длиной волны 532 нм. Образцы были получены методом механической эксфолиации монослоёв MoSe_2 и WSe_2 , а также относительно тонких ($\sim 20\text{-}40$ нм) слоёв гексагонального нитрида бора (hBN), которые выполняли роль оболочки для защиты монослоёв MoSe_2 и WSe_2 от окисления и абсорбции атомов на поверхность. Слои поочерёдно накладывались на подложку SiO_2 , и полученный образец представляет собой связанные квантовые ямы, в которых барьерами являются слои hBN, а электроны и дырки локализованы в монослоях, поэтому в таких структурах могут наблюдаться как прямые, так и непрямые экситоны и трионы. В спектре ФЛ наблюдаются линии, соответствующие прямому экситону и триону, которые локализованы в монослое MoSe_2 , в хорошем соответствии с работой [1]; ширина линии наблюдаемого экситона и триона в широком диапазоне оптического возбуждения составляет около 8 мэВ, что даже меньше, чем в работе [1], что говорит о хорошем качестве полученных образцов. Флуктуации потенциала незначительны благодаря относительно маленькому ($d=2\text{ мкм}$) пятну возбуждения. На рис. 1 представлена серия спектров ФЛ при различных плотностях оптического возбуждения. При малых плотностях возбуждения в спектре преобладает линия триона (DX^T), с ростом накачки линия прямого экситона (DX) становится сильнее, уменьшение отношения DX^T/DX с увеличением оптической накачки находится в хорошем соответствии с теоретическими предсказаниями.

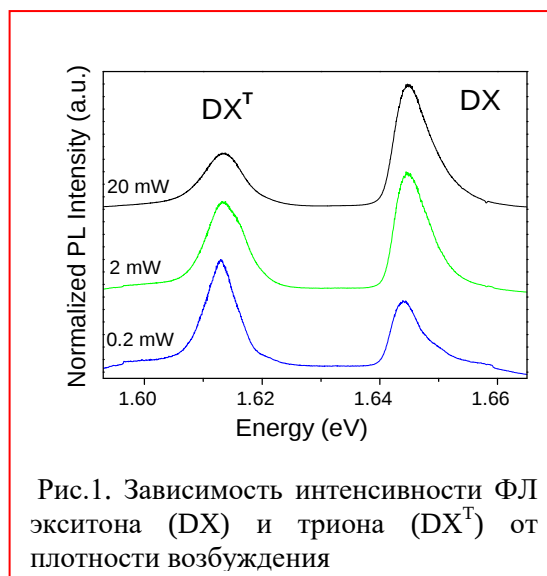


Рис.1. Зависимость интенсивности ФЛ экситона (DX) и триона (DX^T) от плотности возбуждения

Литература

- [1] E. V. Calman, L. H. Fowler-Gerace, L. V. Butov, D. E. Nikonov, I. A. Young, S. Hu, A. Mischenko, A. K. Geim, Arxiv: 1901.08664 (2019).

Термодинамика изинговых квантово-холловских ферромагнетиков

А. Б. Ваньков,* Б. Д. Кайсин*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: vankov@issp.ac.ru*

Недавний прорыв в технологии производства широкозонных гетероструктур на основе ZnO, открыл перспективы для фундаментального изучения физики электрон-электронных корреляций в двумерных электронных системах, а также перспективы создания прикладных устройств с уникальными свойствами. В частности, теоретические оценки показывают, что широкозонные материалы наиболее перспективны для задач эффективной прямой генерации терагерцового излучения в среднем и верхнем диапазоне частот (>200 ГГц). Из-за высокой эффективной массы и низкой диэлектрической проницаемости квазидвумерная электронная система характеризуется высоким параметром взаимодействия $r_s \sim 15$ и сравнимыми по величине Зеемановской и циклотронной энергиями. Высокая электронная подвижность (10^5 - 10^6 см²/В*с) [1], в данного рода структурах, позволила наблюдать множество коллективных явлений таких как сильная перенормировка спиновой восприимчивости и эффективной массы, дробный квантовый эффект Холла, с необычными полуцелыми факторами заполнения[2].

В настоящей работе магнитооптическими методами были изучены термодинамические свойства изинговых квантово-холловских ферромагнетиков вблизи ферромагнитного перехода при $\nu = 2$ в гетероструктурах MgZnO/ZnO. По спектрам неупругого рассеяния света на внутриволновом спиновом экситоне наблюдалось резкое изменение спиновой поляризации ДЭС при небольшой вариации магнитного поля вблизи $\nu = 2$. Было обнаружено, что контраст между парамагнитной и ферромагнитной фазами по разные стороны от точки перехода резко уменьшается при росте температуры ДЭС (Рис.1). Экспериментально оценена температура Кюри изинговых квантово-холловских ферромагнетиков (КХФ) для двух значений электронной концентрации. Полученные значения находятся в качественном согласии с результатами термодинамической модели изинговых КХФ, в которой температура Кюри определяется энергией формирования доменных стенок [3].

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] J. Falson, Y. Kozuka, J. H. Smet, T. Arima, A. Tsukazaki and M. Kawasaki, Applied Physics Letters 107, 082102 (2015).
- [2] J. Falson, D. Maryenko, B. Friess, D. Zhang, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet and M. Kawasaki, Nature Physics 11, 347 (2015).
- [3] A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, I. V. Kukushkin, JETP Lett. 107, 110 (2018).

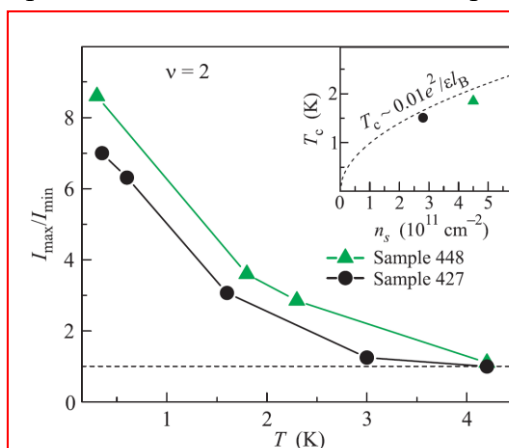


Рис.1. Температурные зависимости контраста изменения интенсивности СЭ при ферромагнитном переходе для двух образцов с различной концентрацией электронов. На вставке: зависимость соответствующей температуры Кюри от концентрации.

Новая система персонального досмотра в субтерагерцовом частотном диапазоне

П. А. Гусихин, * А. А. Дремин, В. М. Муравьев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: gusikhin@issp.ac.ru*

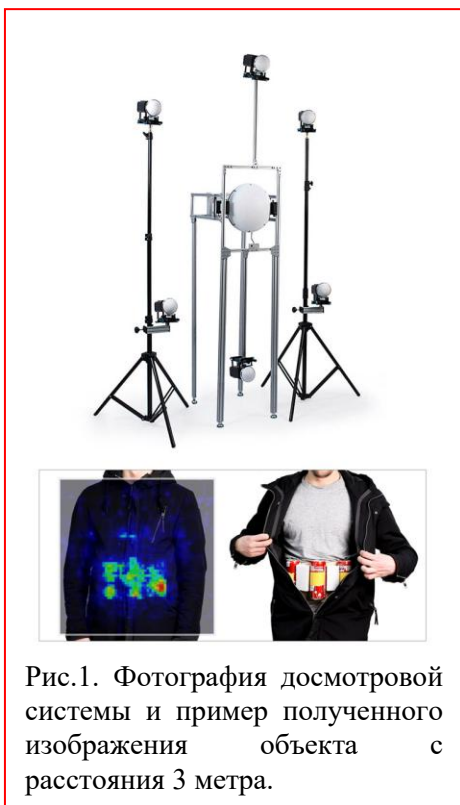


Рис.1. Фотография досмотровой системы и пример полученного изображения объекта с расстояния 3 метра.

Ранее был разработан новый тип полупроводникового детектора субтерагерцового частотного диапазона, функционирующего при комнатной температуре [1]. Эти детекторы подходят для создания массивов, благодаря достаточно простому технологическому циклу и хорошей масштабируемости всех процессов. Одна из наиболее перспективных областей их применения – это системы дистанционного сканирования.

Нами была разработана новая система персонального досмотра на основе наших полупроводниковых детекторов. Система предназначена для дистанционного детектирования объектов, скрытых под одеждой, на фоне человеческого тела. Для детектирования используется режим отражения. Несколько источников излучения субтерагерцового частотного диапазона освещают интересующую область с различных направлений. Это необходимо, так как на используемой длине волны $\lambda = 3$ мм отражение от большинства объектов является зеркальным. Для формирования пучка необходимой ширины используются тефлоновые коллиматорные линзы, установленные на источники. Объективная

линза, также изготовленная из тефлона, собирает отражённый от объекта сигнал и формирует изображение на субтерагерцовой камере. Разработанное для данной системы программное обеспечение позволяет совмещать изображение в субтерагерцовом диапазоне с изображением в видимом диапазоне.

Нами были проведены различные тесты для определения разрешающей способности системы, глубины резко изображаемого пространства. Кроме того, были получены контрастные изображения скрытых под одеждой объектов (рис. 1). К сожалению, получение изображений с достаточным контрастом в некоторых случаях является достаточно сложной задачей, так как человеческое тело отражает большую часть падающего излучения. На решение данной проблемы будут направлены следующие исследования, связанные с внедрением бинокулярного зрения, а также с использованием информации о поляризации отражённого излучения для определения материала отражающего объекта.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

Литература

[1] V.M. Muravev and I.V. Kukushkin, Appl. Phys. Lett. 100, 082102 (2012).

Слабозатухающие релятивистские плазменные возбуждения в двумерной электронной системе

П. А. Гусихин,* В. М. Муравьев, А. А. Фортунатов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: gusikhin@issp.ac.ru*

В данной работе проводится экспериментальное изучение слабозатухающих релятивистских плазменных возбуждений в двумерной электронной системе с высокой проводимостью [1-3]. Для исследований применялась методика измерения микроволнового пропускания между связанными плазмонными резонаторами. В данной

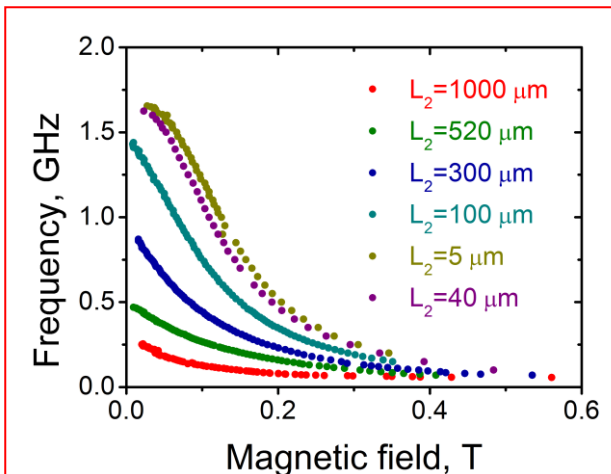


Рис.1. Зависимость магнитодисперсии релятивистской плазменной моды от расстояния между затвором и заземлённым концом полоски двумерных электронов.

конфигурации образец представлял собой полоску двумерной электронной системы, сформированную в гетероструктуре GaAs/AlGaAs с электронной плотностью $1.2 \times 10^{11} - 4.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $10^5 - 6 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, поверх которой были расположены два металлических затвора, формирующих резонаторы.

Релятивистские плазменные возбуждения обладают аномально малой шириной, это обеспечивает их существование вплоть до комнатной температуры, что делает открытое явление интересным с точки зрения различных приложений.

Для описания данного явления была предложена модель эффективного резонансного контура, содержащего ёмкостную и индуктивную часть. Ёмкостная часть связана с конденсатором, образованным двумерной электронной системой и лежащим поверх неё металлическим затвором. Для определения индуктивной части в данной работе была экспериментально изучена зависимость частоты резонанса от размеров двумерной электронной системы и затвора вне плазмонного резонатора. Было установлено, что при увеличении длины двумерной электронной системы между подзатворной областью и заземлённым концом системы частота возбуждения существенно уменьшается (Рис. 1). При этом, длина затворов никак не влияет на частоту плазменного возбуждения.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

Литература

- [1] П.А. Гусихин, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, 100, 732 (2014).
- [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, I.V. Andreev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett., 114, 106805 (2015).
- [3] P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, I.V. Kukushkin, JETP Lett., 102, 859 (2015).

Субнаносекундные акустооптические переключения состояния бистабильной экситон-поляритонной системы в полупроводниковых микрорезонаторах

А. А. Демнев*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: demenev@issp.ac.ru*

Экситонные поляритоны – квазидвумерные композитные бозоны, возникающие в полупроводниковых микрорезонаторах (МР) в режиме сильной экситон-фотонной связи. Преимуществом газа поляритонов в МР является то, что уже при сравнительно малых плотностях оптического возбуждения перенормировка частоты поляритонного уровня может заметно превышать его спектральную ширину. В результате возникает ряд интересных явлений, например, оптическая би- и мультистабильность. Расчеты показывают, что состоянием бистабильной поляритонной системы можно управлять изменяя частоту экситонного уровня в КЯ акусто-деформационными импульсами при фиксированном внешнем поле [1].

В настоящей работе исследованы акустооптические переключения в бистабильной поляритонной системе в МР на основе GaAs под действием сверхкоротких (~ 10 пс) импульсов деформации. Поляритонный конденсат возбуждался резонансно по нормали к МР 50-нс лазерными импульсами с $\hbar\omega = E_{LP} + 140$ мкэВ.

Импульсы деформации генерировались на поверхности GaAs-подложки при поглощении 200-фс лазерных импульсов и достигали КЯ в активном слое МР за 73.9 нс. При прохождении области с КЯ импульс деформации вызывал обратимые сдвиги частоты экситонного уровня, что приводило к сдвигу уровня поляритона до 90 мкэВ и резкому (~ 300 пс) возрастанию в 15 раз пропускания МР, т.е. переходу системы на верхнюю ветвь S-кривой (рис.1). Таким образом, в работе показано, что сверхкороткие обратимые изменения частоты экситонного уровня приводят к переключению состояния бистабильной поляритонной системы на пикосекундном масштабе времен.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

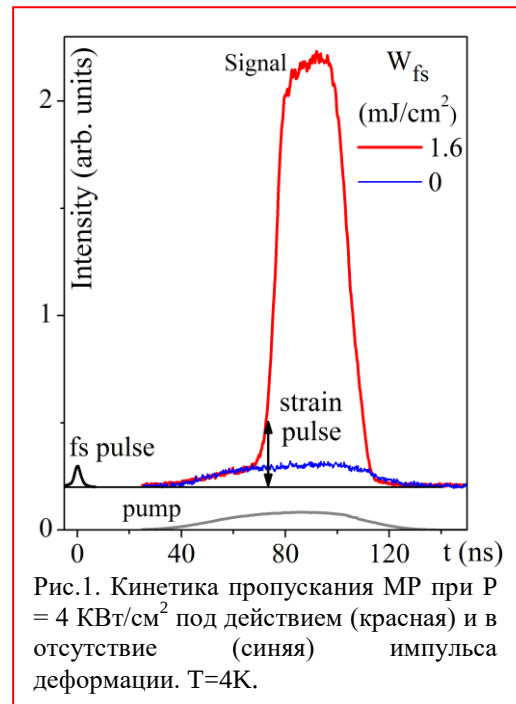


Рис.1. Кинетика пропускания МР при $P = 4$ КВт/см² под действием (красная) и в отсутствие (синяя) импульса деформации. $T=4$ К.

Литература

- [1] S.S. Gavrilov, N.A. Gippius, Phys. Rev. B. 86, 085317 (2012).

Керровское вращение в неравновесных электронных системах

А.С.Журавлев¹, В.Е.Кирпичев¹

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: zhuravlev@issp.ac.ru

Практически все известные достижения последних лет в твердотельных технологиях связаны либо с появлением новых материалов и материальных систем (квазидвумерные, квазиодномерные и квазинульмерные гетероструктуры, слоистые структуры, углеродные низкоразмерные системы и т.д.), либо с возникновением новых физических подходов к хорошо известным явлениям (сверхпроводящие и полупроводниковые кубиты, однофотонные источники излучения, квантовая криптография и т.д.). Большое внимание научной общественности в последнее время уделяется спинтронике — области технологических приложений, использующих манипулирование спиновой степенью свободы [1].

Исследование Керровского вращения является эффективным механизмом для исследований спиновой когерентности фотовозбужденного неравновесного ансамбля спиновых экситонов. Было исследовано Керровское вращение в равновесных системах, в частности, зависимость динамики спиновой прецессии от концентрации двумерных электронов. Были обнаружены и исследованы особенности спиновой релаксации на нечётных факторах заполнения электронов [2]. Разработана методика создания, манипуляции и зондирования спиновых экситонов в холловских изоляторах. Обнаружена конденсация спиновых экситонов. Экспериментально показано, что спиновой транспорт имеет не диффузионный характер, а длина свободного пробега спина при переходе в конденсатное состояние возрастает по крайней мере на три порядка величины [3]. Однако приведенные экспериментальные методики не дают представления о времени сбоя фазы

коллективной спиновой прецессии конденсата спиновых экситонов, а также о вязкости спиновой системы. Время-разрешенное керровское вращение позволяет получить информацию о времени сбоя фазы в неравновесной системе.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН

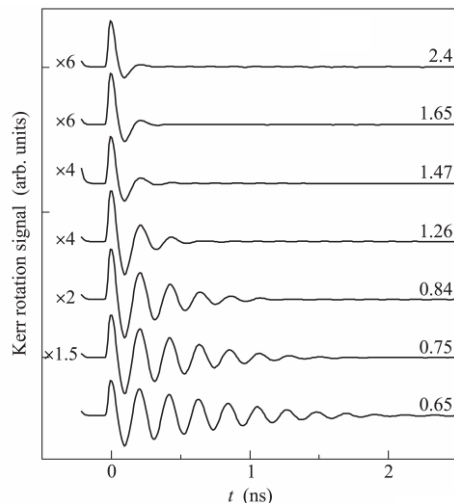


Рис 1. Керровский сигнал записанный при $B=1$ (геометрия Фойгхта), в зависимости от концентрации двумерных электронов в единицах 10^{11} см^{-2}

Литература

- [1] Igor Žutić, Jaroslav Fabian, and S. Das Sarma Review Mod. Phys. 76, 323 (2004).
- [2] S. Dickmann PRL 110, 166801 (2013)
- [3] L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, V. B. Timofeev, I. V. Kukushkin, and S. Schmult, Sci. Rep. 8, 10948 (2018).

Электронное комбинационное рассеяние света в недодопированном высокотемпературном сверхпроводнике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($x = 0.7$)

С. В. Зайцев*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: szaitsev@issp.ac.ru*

Исследование электронного комбинационного рассеяния (КР) света в высокотемпературном сверхпроводнике (ВТСП) в сверхпроводящем и нормальном состояниях позволяет получить информацию о природе элементарных возбуждений в них, а ниже температуры сверхпроводящего перехода T_C изучать характерные особенности сверхпроводящей щели, такие как её величина 2Δ и симметрия.

На рис.1 приведены отношения $r(\omega, T) = R''(\omega, T)/R''(\omega, 100\text{K})$ для недодопированного образца $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ($x=0.7$) с $T_C = 74\text{K}$. Здесь $R''(\omega, T)$ - мнимая часть электронного отклика связана со спектром КР $S(\omega, T)$ как $S(\omega, T) = -[1+n(\omega, T)]R''(\omega, T)/\pi$ [1]. Помимо узких линий, отвечающих оптическим фононам, в спектрах КР наблюдается широкий электронный континуум. Ниже T_C происходит перераспределение интенсивности континуума, однако область этих изменений сдвигается в сторону более низких частот, а сам эффект слабее чем в оптимально допированном $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$. Изменения $r(\omega, T)$ в поляризации ($x'y'$) характерны для возникновения сверхпроводящей щели:

- (i) $r(\omega, T) < 1$ в области низких частот и $r(\omega, T) \approx 1$ в высокочастотной области;
- (ii) образуется слабый 2Δ -пик при $\omega \approx 270\text{ cm}^{-1}$, где $r(\omega, T) > 1$ (отмечено стрелкой на Рис.1);
- (iii) сильно выражены запрещённые в КР фононы 230 cm^{-1} и 600 cm^{-1} , появление которых вызвано структурным беспорядком. Этот факт указывает на существенный беспорядок в недодопированном образце ВТСП, который сильно размывает щелевые особенности. Принимая за 2Δ -пик слабый порог при $\omega \approx 270\text{ cm}^{-1}$, получим в кристалле $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.7}$ отношение $2\Delta/T_C \approx 5.3$, что близко к значению $2\Delta/T_C \approx 5.5$ как в оптимально допированном $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ ($T_C = 92\text{K}$), так и в слабо допированном $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ($T_C = 53\text{K}$) [1].

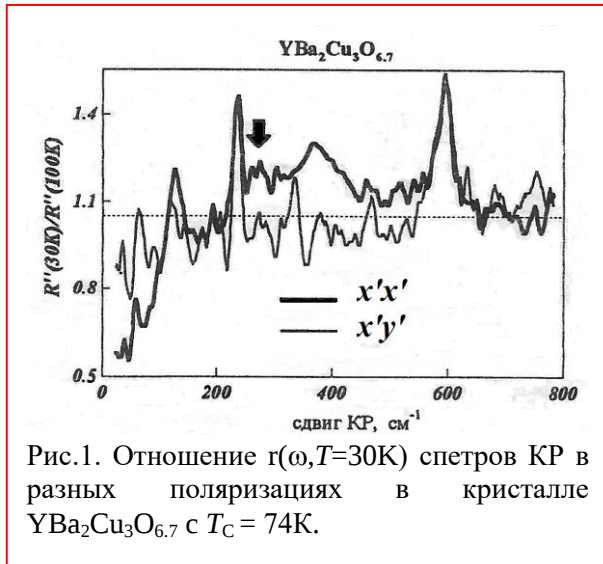


Рис.1. Отношение $r(\omega, T=30\text{K})$ спектров КР в разных поляризациях в кристалле $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.7}$ с $T_C = 74\text{K}$.

значением $x \approx 0.5 - 0.9$ при изменении T_C в пределах от 50 до 92K. Такое значение отношения свидетельствует о сильной сверхпроводящей связи в этом ВТСП-соединении. В то же время, в поляризации ($x'y'$) заметных спектральных изменений в $R''(\omega, T)$ не наблюдается, что указывает на изотропную сверхпроводящую щель в недодопированном $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$.

Литература

[1] А.А. Максимов, С.В. Зайцев, И.И. Тартаковский, М.В. Klein, В.В. Veal, Письма в ЖЭТФ 61, 842 (1995).

Субпикосекундное пространственное разделение зарядов в структурах 2-типа ZnSe/BeTe при высокой плотности фотовозбуждения

С. В. Зайцев*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: szaitsev@issp.ac.ru*

Исследованы сверхрешетки ZnSe/BeTe из чередующихся слоев ZnSe и BeTe: #1 - $(10/5) \times 10$, #2 - $(15/7.5) \times 5$ и #3 - $(20/10) \times 10$ (толщины слоев даны в нм). Обнаружено существенное замедление кинетики люминесценции пространственно прямого оптического перехода DT в слое ZnSe при высокой плотности фемтосекундного фотовозбуждения P . Время затухания $\tau(P)$ импульсов свечения DT (Рис.1а) определяется временами излучательной рекомбинации $\tau_R(P)$ в слое ZnSe, безызлучательной рекомбинации τ_{NR} и временем ухода фотовозбужденных дырок $\tau_{rel}(P)$ из слоя ZnSe в слой BeTe как $1/\tau = 1/\tau_R + 1/\tau_{NR} + 1/\tau_{rel}$.

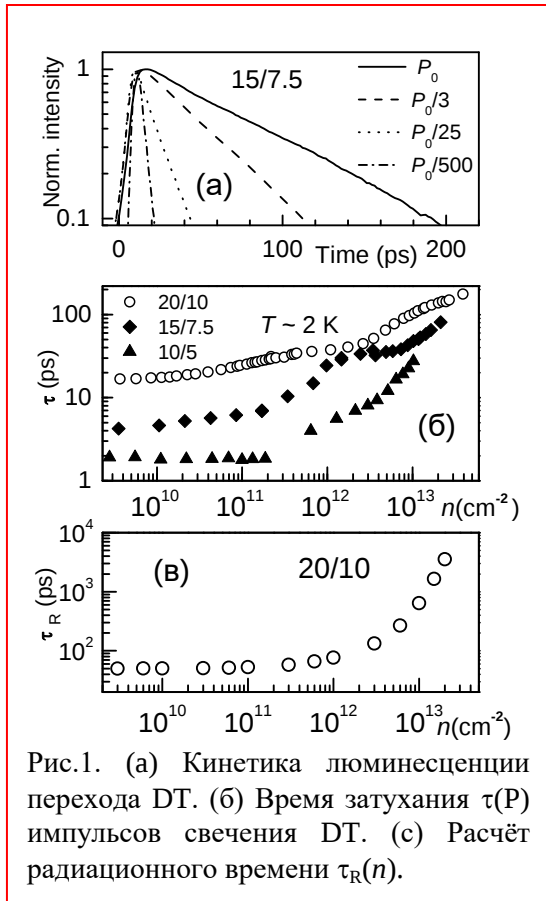


Рис.1. (а) Кинетика люминесценции перехода DT. (б) Время затухания $\tau(P)$ импульсов свечения DT. (с) Расчёт радиационного времени $\tau_R(n)$.

Согласно расчётам [1], после частичной релаксации дырок в условиях высокой плотности n пространственно разделённых электронов и дырок возникающий изгиб зон приводит к формированию потенциального барьера для оставшихся надбарьерных дырок в слое ZnSe (Рис.2а). Возникающий барьер, прозрачность которого падает с ростом P , препятствует и замедляет дальнейшую релаксацию надбарьерных дырок, что приводит к росту $\tau_{rel}(P)$ вплоть до радиационного времени $\tau_R \sim 40-50$ пс (Рис.1б). Дальнейший рост $\tau(P)$ обусловлен ростом $\tau_R(P)$ при $n \sim 10^{12}-10^{13}$ см⁻² (Рис.1в). Замедление кинетики DT сразу после лазерного импульса, с точностью ≤ 2 пс (разрешение установки), свидетельствует о том, что значительная часть дырок рассеивается на этапе их быстрой горячей релаксации, не доходя до нижнего надбарьерного уровня в слое ZnSe.

Работа частично поддержана проектом РФФИ № 17-02-00959.

Литература

- [1] А.А. Максимов, С.В. Зайцев, Е.В. Филатов, А.В. Ларионов, И.И. Тартаковский, Д.Р. Яковлев, А. Вааг, Письма в ЖЭТФ 88, 587 (2008).

Оптическое детектирование циклотронного резонанса в ферромагнитных полупроводниковых гетероструктурах с дельта-слоем Mn

С. В. Зайцев*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: szaitsev@issp.ac.ru

В работе исследован циклотронный резонанс носителей в структурах, содержащих квантовую яму (КЯ) $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ и ферромагнитный (ФМ) δ -слой Mn в барьере GaAs (спейсер 3.6 нм). δ -легирование акцепторными примесями марганца и углерода (δ -<C>-слой со стороны подложки) приводит к появлению в КЯ дырочного газа с плотностью $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ при $T = 4 \text{ K}$ [1]. 2D характер дырок подтверждается наблюдением осцилляций Шубникова-де Гааза, когда магнитное поле перпендикулярно плоскости структуры. Применялся метод оптического детектирования магнито-поглощения в дальней ИК области (газовый лазер с длиной волны 118.8 мкм и энергией $E_{\text{FIR}} = 10.4 \text{ мэВ}$) и изучалось изменение спектра рекомбинационного излучения 2D дырочного газа (Рис.1а) в зависимости от магнитного поля (Рис.1б). Полученная таким образом зависимость поглощения носителями ИК излучения демонстрирует слабо выраженный максимум при $B_{\text{max}} = 3.8 \text{ Тл}$. Из квазиклассического соотношения для циклотронной энергии $E_{\text{FIR}} = \hbar e B / m^*$ оценена циклотронная квазиклассическая масса носителей $m^* = 0.042 m_0$, где m_0 - масса электрона. Столь малая величина m^* , значительно меньше массы электрона в GaAs, и даже меньше чем в материале КЯ $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ ($m^* \sim 0.052 m_0$) указывает на электронную природу циклотронного резонанса. Предполагается, что уменьшение наблюдаемой массы электрона в КЯ обусловлено сильным изгибом зон в окрестности заряженного δ -<Mn> слоя высокой плотности $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ [1], при этом циклотронный резонанс дырок подавлен (размыт) их аномально сильным рассеянием на флуктуационном электростатическом потенциале близкорасположенного δ -<Mn> слоя.

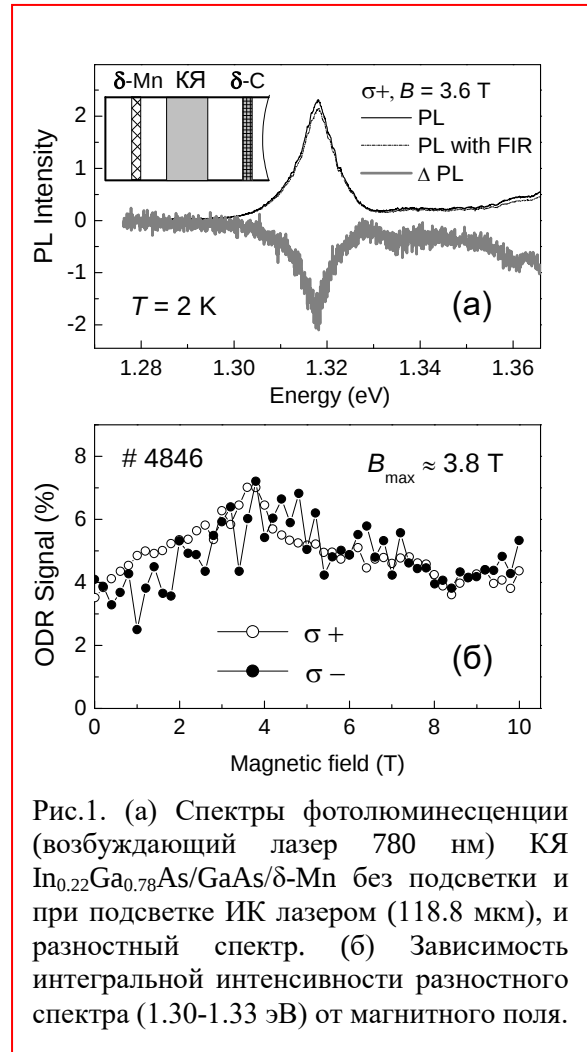


Рис.1. (а) Спектры фотолюминесценции (возбуждающий лазер 780 нм) КЯ $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\delta\text{-Mn}$ без подсветки и при подсветке ИК лазером (118.8 мкм), и разностный спектр. (б) Зависимость интегральной интенсивности разностного спектра (1.30-1.33 эВ) от магнитного поля.

Литература

- [1] М.А. Панков, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков, А.Б. Давыдов, Е.З. Мейлихов, Р.М. Фарзетдинова, Э.М. Пашаев, М.А. Чуев, И.А. Субботин, И.А. Лихачев, Б.Н. Звонков, А.В. Лашкул, Р. Лайхо, ЖЭТФ 136, 346 (2009).

Наблюдение новых плазменных мод в двумерной электронной системе с близким затвором

А. М. Зарезин^{1,2} В. М. Муравьев,¹ П. А. Гусихин¹

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

²МФТИ (НИУ), 141700, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д.9

Плазмоны в двумерных электронных системах (ДЭС), в том числе и с сильным экранированием, были теоретически предсказаны и исследованы более 40 лет назад. Несмотря на это, оказалось, что в ДЭС с близко расположенным металлическим затвором существует плазменная мода, которая не наблюдалась до настоящего времени. Выражение для дисперсии нового плазмона, названного proximity plasmon, имеет следующий вид [1]:

$$\omega_{pr}(q) = \sqrt{\frac{2n_s e^2 \hbar q}{m^* \epsilon \epsilon_0 W}}, \quad qW \ll 1 \quad (1),$$

где n_s – концентрация 2D электронов, m^* – эффективная масса электрона, $\hbar$ – расстояние от затвора до ДЭС, ϵ – эффективная диэлектрическая проницаемость окружения. Геометрия и схематический вид образца показаны на вставке к рисунку 1 (а). Исследования проводились на гетероструктуре GaAs/Al_xGa_{1-x}As с одиночной квантовой ямой, расположенной на глубине 440 нм. Было проведено экспериментальное наблюдение данной моды методами оптического детектирования

микроволнового поглощения. Данная мода обладает рядом необычных и уникальных свойств, исследованных в представленной работе. Новый плазмон наблюдается в системе с сильным экранированием и, кроме того, имеет одномерную природу (нет узлов в перпендикулярном затвору направлении). Все это свидетельствует в пользу линейного закона дисперсии. Поэтому абсолютно контринтуитивным является тот факт, что данная мода обладает корневым законом дисперсии: формула (1) и Рис.1 (b). Также, особенностью нового плазмона является аномально сильное взаимодействие со светом. Несмотря на то, что параметр запаздывания [2,3] в проведенных экспериментах для образца с наибольшей длиной затвора составлял всего $A = \frac{\omega_{pl}(q)}{\omega_{light}(q)} = 0.1$, наблюдались эффекты запаздывания (Рис.1 (b)), в 40 раз превосходящие по величине теоретические предсказания [2].

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

Литература

- [1] A. A. Zabolotnykh and V. A. Volkov, Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).
- [2] P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, A. A. Zagitova, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 121, 176804 (2018).
- [3] I. V. Kukushkin, J. H. Smet, S. A. Mikhailov, D. V. Kulakovskii, K. von Klitzing, and W. Wegscheider, Phys. Rev. Lett. 90, 156801 (2003).

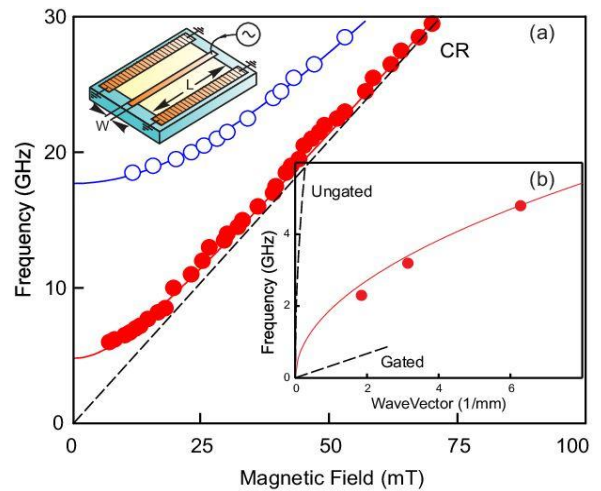


Рис.1 (а) Магнитодисперсия новой плазменной моды (красные точки) и экранированного плазмона (синие пустые точки). Пунктирная линия – циклотронный резонанс. На вставке показана схема образца. В центре – металлический затвор, по бокам – заземленные контакты. (b) Дисперсионная зависимость нового плазмона.

Ферромагнитный переход в ДЭС на основе ZnO

Б. Д. Кайсин**ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: kaysin@issp.ac.ru*

В последние 10 лет широкое внимание привлекли к себе высококачественные гетероструктуры на основе ZnO/MgZnO, которые имеют целый ряд перспективных, с точки зрения приложений, свойств: ширина запрещенной зоны в УФ области, высокие значения напряжений пробоя, повышенные величины насыщения дрейфовой скорости носителей и их эффективных масс, а также уменьшенная диэлектрическая проницаемость - всё в сравнении с традиционными кремнием и арсенидом галлия, открывают перспективы создания прикладных устройств с уникальными характеристиками, а также уникальных объектов фундаментальных исследований.

В данной работе был реализован метод резонансного КРС и применён для изучения возбуждений в квазидвумерной электронной системе на основе гетероструктур ZnO/MgZnO.

Магнитооптическими методами изучены особенности фазового перехода Изинговых квантово-холловских ферромагнетиков на целочисленных факторах заполнения [1]. По перестройке оптического спектра в условиях пересечения уровней Ландау, вызванных наклоном магнитного поля в комбинации с усиленной спиновой восприимчивостью, установлен переход между холловскими ферромагнетиком и парамагнетиком. Синхронное изменение наблюдалось в спектральных линиях двумерной фотолюминесценции и в линиях КРС. Помимо стабильной области парамагнитной и ферромагнитной фаз была найдена промежуточная область, в которой происходит формирование доменов обеих фаз. Спиновая конфигурация определялась по линиям КРС. Первым индикатором стал спиновой экситон между двумя спин-расщеплёнными подуровнями Ландау, который имеет большую интенсивность в случае ферромагнитного упорядочения. Вторым индикатор – энергетический сдвиг в межподзонам возбуждении зарядовой плотности, который реализуется в силу изменения обменного вклада при переходе между фазами [2].

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 96, 235401 (2017).
 [2] L. V. Kulik, A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin, JETP Lett. 105, 358 (2017).

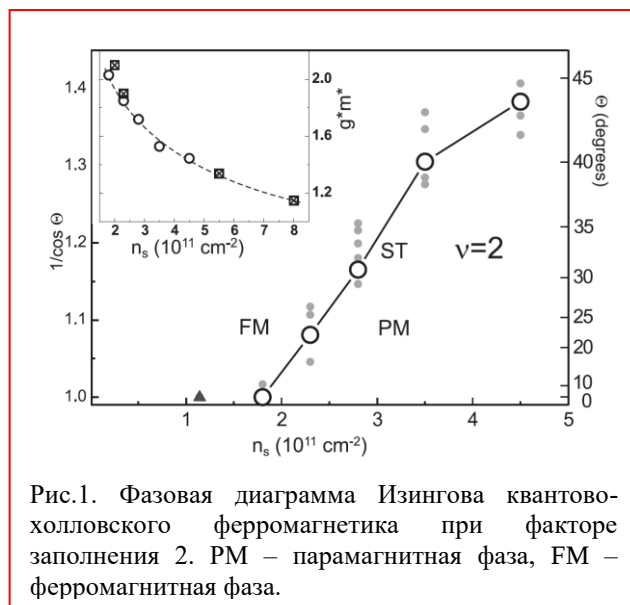


Рис.1. Фазовая диаграмма Изингова квантово-холловского ферромагнетика при факторе заполнения 2. PM – парамагнитная фаза, FM – ферромагнитная фаза.

Неравновесное заполнение электронных состояний под микроволновым излучением

А. А. Капустин,* С. И. Дорожкин

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: kapustin@issp.ac.ru*

В полевых транзисторах с двумя электронными слоями, создаваемыми в широкой квантовой яме GaAs, обнаружены индуцированные микроволновым излучением магнетоосцилляции тока смещения (рис.1, правая ось), возникающего при модуляции мощности микроволнового излучения и измеряемого между затвором транзистора и электронной системой на частоте модуляции. Осцилляции периодичны в обратном магнитном поле с периодом $\Delta(1/H)$,

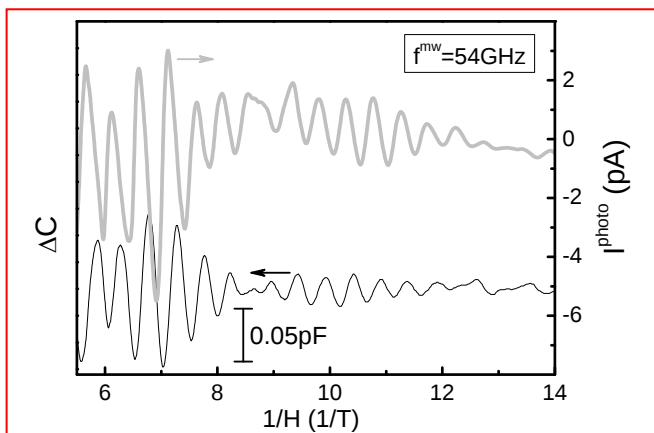


Рис. 1. Индуцированные микроволновым излучением частоты 54 ГГц магнетоосцилляции емкости (левая ось) и тока смещения, измеренного между затвором и двухслойной электронной системой полевого транзистора GaAs/AlGaAs (правая ось). Температура, при которой выполнены измерения, $T=0.5$ К.

определяемым разностью плотностей электронов $n_{s1} - n_{s2}$ в разных слоях: $\Delta(1/H) = 2e/h(n_{s1} - n_{s2})$. Это условие соответствует соизмеримости разности энергий размерного квантования в слоях и циклотронной энергии. Любопытно, что частота микроволнового излучения в период этих осцилляций не входит. Осцилляции тока смещения соответствуют перераспределению электронов между слоями под влиянием облучения. Обнаруженный эффект подтверждает интерпретацию обнаруженных ранее [1] индуцированных излучением магнетоосцилляций емкости полевого транзистора, наблюдаемых на этих же образцах (Рис.1, левая ось), которая

заключается в неравновесном заполнении электронных состояний под облучением. Частота микроволнового излучения определяет положения биений наблюдаемых осцилляций. В результате осцилляционная картина является проявлением интерференции осцилляций двух частот, вторая из которых определяется соизмеримостью энергии фотона и циклотронной энергии электронов.

Литература

- [1] S.I. Dorozhkin, A.A. Kapustin, V. Umansky, K. von Klitzing, and J. H. Smet, Phys. Rev. Lett. 117, 176801 (2016).

Повышенное пропускание микроволн слоистым метаматериалом

И. А. Карпов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

В последние годы уделяется большое внимание изучению необычных свойств как многослойных структур, так и перфорированных металлических поверхностей и плёнок («fishnet» – «невод»). Такие перфорированные металлические поверхности поддерживают существование поверхностных плазмонов – электромагнитных поверхностных возбуждений, локализованных вблизи поверхности металла [1], что приводит при падении волны электромагнитного излучения на такую поверхность к возникновению сильных электрических полей вдоль этой поверхности, а также ведёт к прохождению падающего на такую модифицированную поверхность электромагнитного излучения через массив отверстий субволнового размера, как правило, в 4 – 10 раз меньшего, чем длина падающей электромагнитной волны [2].

Каждый такой перфорированный металлический слой метаматериала, как показано в работе [3], эквивалентен тонкому слою с чисто мнимым показателем преломления и имитирует в микроволновом диапазоне поведение плазменных металлов (Au, Ag) в видимом диапазоне [1].

В данной работе рассмотрено пропускание микроволн в диапазоне от 7 ГГц до 20 ГГц многослойной метаматериальной металл-диэлектрической структурой с новым оригинальным дизайном ромбообразных отверстий как в ближнем, так и в дальнем поле. Спектр пропускания исследованной структуры демонстрирует восьмикратное увеличение пропускания микроволнового излучения позади одиночного отверстия этой структуры в ближнем поле. В дальнем поле спектр пропускания изученной многослойной структуры имеет несколько резонансных пиков, количество которых равно числу диэлектрических прослоек этой структуры, что объясняется как Фабри-Перо резонансами в её диэлектрических прослойках, так и взаимодействием двух противоположно распространяющихся в диэлектрических зазорах поверхностных плазменных поляритонных мод (в направлении, параллельном плоскости слоёв) [4].

В указанном выше диапазоне частот были получены картины электрической составляющей микроволнового поля [5] вокруг многослойной металл-диэлектрической метаматериальной «fishnet» структуры при различной её ориентации по отношению к падающему на неё микроволновому излучению. На картинах поля при частотах 10 ГГц и 11 ГГц отчётливо видны резонансные возмущения микроволн. Так как резонансное поведение структуры возникало ниже частоты отсечки “дырочного волновода”, то можно говорить об отрицательном эффективном показателе преломления для данного метаматериала в этой резонансной полосе частот.

Литература

- [1] J. B. Pendry, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, Science 305, 847 (2004).
- [2] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio & P. A. Wolff, Nature 391, 667 (1998).
- [3] C. A. M. Butler, J. Parsons, J. R. Sambles, A. P. Hibbins, and P. A. Hobson, Applied Physics Letters 95, 174101 (2009).
- [4] A. Mary, S. G. Rodrigo, L. Martin-Moreno and F. J. Garcia-Vidal, Journal of Physics: Condensed Matter 20, 304215 (2008).
- [5] I. A. Karpov and E. D. Shoo, Review of Scientific Instruments 83, 074704 (2012).

Трансляционно-инвариантные комплексы магнитоэкситонов

В. А. Кузнецов,^{1,2*} Л. И. Мусина,^{1,3} А. С. Журавлёв¹¹*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*²*НИУ Высшая Школа Экономики, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20*³*Московский Физико-Технический Институт (ГУ), 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*

*e-mail: volod_kuzn@issp.ac.ru

Экситоны нестабильны в металлах, в частности, в двумерном электронном газе. Тем не менее, существует возможность формирования долгоживущих магнитоэкситонов в холловском изоляторе. Магнитоэкситоны совмещают в себе свойства экситонов в двумерных изоляторах и плазмонов в двумерных металлах. Простейшей реализацией представляют собой магнитоэкситоны, образованные электроном с первого уровня Ландау в зоне проводимости и дыркой с нулевого уровня Ландау в зоне проводимости. Существует два магнитоэкситона: синглет с полным спином $S = 0$; и триплет с полным спином $S = 1$ и проекциями спина вдоль оси магнитного поля $S_z = -1, 0, 1$. Синглетный магнитоэкситон $S = 0$ является магнитоплазмоном Кона. Он быстро релаксирует в основное состояние с помощью циклотронного излучения. В отличие от спинового синглета, триплетный магнитоэкситон не может распадаться с излучением фотона вследствие сохранения спина. Многочастичное кулоновское взаимодействие понижает его энергию ниже энергии циклотронной. Таким образом, триплетный магнитоэкситон является возбужденным состоянием с самой низкой энергией [1].

По этой причине время релаксации спиновых магнитоэкситонов достигает сотен микросекунд [2]. Огромное время жизни магнитоэкситонов существенно изменяет спектр фотолюминесценции за счет образования трехчастичных комплексов. Мы обнаружили новые особенности в спектре фотолюминесценции, которые соотносятся с образованием трионов, плазмарионов (трехчастичное состояние, состоящее из магнитоплазмона и связанной с ним дополнительной дырки) и плазмон-экситонных молекулы (экзотическое четырехчастичное состояние, состоящее из магнитоплазмона и связанного с ним спин-триплетного магнитоэкситона) [3]. Более того, в спектрах люминесценции обнаружены линии, соотносящиеся с возбужденными состояниями трионов [4].

Литература

- [1] L. V. Kulik, I. V. Kukushin, S. Dickmann, V. E. Kirpichev, A. B. Van'kov, A. L. Parakhonsky, J. H. Smet, K. v. Klitzing, and W. Wegscheider Phys. Rev. B 72, 073304 (2005).
- [2] L. V. Kulik, A.V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. B. Timofeev, S. Dickmann, and I. V. Kukushkin Sci. Rep. 5, 10354 (2015).
- [3] A. S. Zhuravlev, V. A. Kuznetsov, L. V. Kulik, V. E. Bisti, V. E. Kirpichev, I. V. Kukushkin, and S. Schmult Phys. Rev. Lett. 117, 196802 (2016).
- [4] V. A. Kuznetsov, L. V. Kulik, M. D. Velikanov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, S. Schmult, and I. V. Kukushkin Phys. Rev. B 98, 205303 (2018).

Ферми-жидкостные эффекты и перенормировка массы квазичастиц в системе двумерных электронов с сильным взаимодействием

В.И. Кукушкин,¹ **С. Шмульт**²

¹*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*

²*Max-Planck-Institutefur Festkörperforschung, 70569 Stuttgart, Germany*

Из анализа спектров излучательной

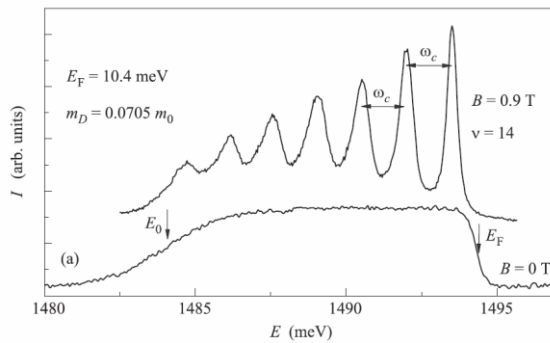


Рис.1. Спектры излучательной рекомбинации двумерных электронов с фотовозбужденными дырками, связанными на акцепторах, измеренные в магнитном поле $B = 0$ Т и 0.9 Т ($\nu = 14$).

рекомбинации двумерных электронов с фотовозбужденными дырками, связанными на удаленных акцепторах, изучена зависимость энергии Ферми квазичастиц от электронной плотности и, таким образом, измерена зависимость перенормированной массы квазичастиц от концентрации двумерных электронов. Установлено, что по мере уменьшения электронной плотности (при увеличении параметра r_s до 4.5) эффективная масса состояний квазичастиц увеличивается на 35 процентов по сравнению с циклотронной массой электронов. Показано, что в перпендикулярном магнитном поле концепция квазичастиц в двумерной ферми-жидкости сохраняется не только вблизи поверхности Ферми, но и глубоко под ней - вплоть до дна зоны размерного квантования, поскольку уширение возбуждений оказывается значительно меньше, чем их энергия.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ-17-02-00122

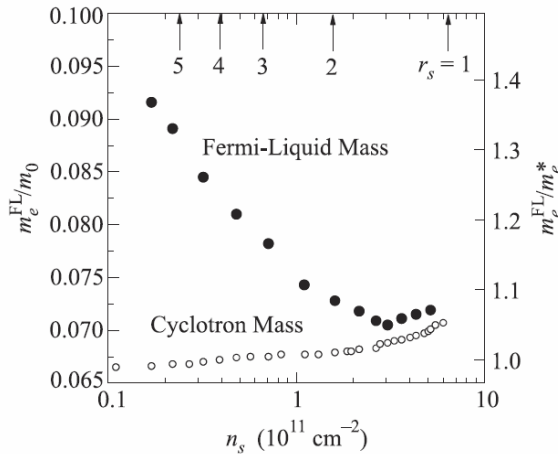


Рис. 2. Зависимость перенормированной эффективной массы плотности состояний в Ферми-жидкости двумерных электронов (сплошные символы) и циклотронной массы (пустые символы) от концентрации.

Дополнительные резонансы гигантского усиления рамановского рассеяния света в слоистых структурах с несколькими металлическими слоями

Я.В. Гришина, В.И. Кукушкин, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Обнаружено, что в слоистых структурах с двумя металлическими слоями, разделенными слоем диэлектрика определенной толщины, помимо основного плазмон-поляритонного резонанса гигантского усиления рамановского рассеяния (SERS), находящегося в области 480 - 530 нм, имеется дополнительный SERS-резонанс, который сдвинут в сторону больших длин волн и имеет сравнимую амплитуду. Установлено, что положение этого дополнительного SERS-резонанса определяется толщиной диэлектрической прослойки, разделяющей металлические слои, что позволяет изменять спектральное положение дополнительного резонанса в довольно широких пределах. Показано, что обнаруженный SERS-резонанс связан с дополнительной плазмон-поляритонной модой, возникающей в структурах с несколькими металлическими слоями.

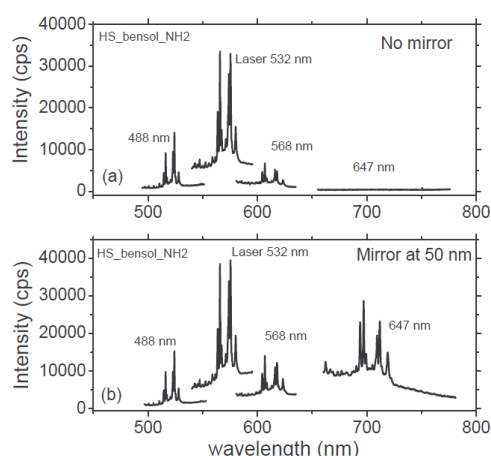


Рис.1. Спектры поверхностно-усиленного рамановского рассеяния света, измеренные при четырех различных длинах волн лазера: 488 нм, 532 нм, 568 нм и 647 нм на стандартной SERS-подложке (а) и на SERS-подложке с двумя слоями серебра, которые были разделены слоем диэлектрика толщиной 50 нм.

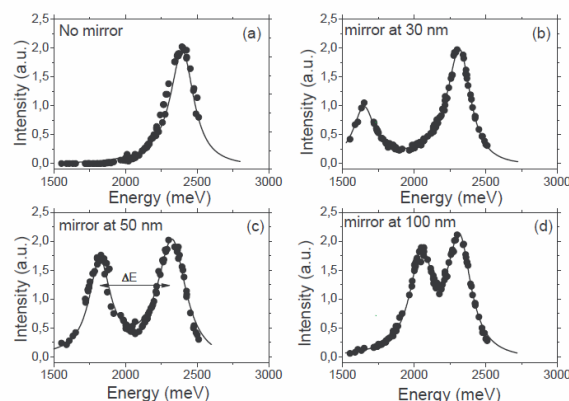


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента гигантского усиления рамановского рассеяния, измеренные как для тестовой структуры без дополнительного зеркала (а), так для трех структур с дополнительным зеркалом, отдаленным от верхнего слоя на расстояние 30 нм, 50 нм и 100 нм.

Передача информации из объема Холловского изолятора с помощью магнетофермионного конденсата

Л. В. Кулик, А. С. Журавлев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Имплементация новых степеней свободы носителей заряда в твердых телах открывает совершенно неожиданные перспективы для развития технологических приложений. В последнее время активно развивается новая научная область спинтроники – магноника, связанная с использованием для передачи информации спиновых волн. Большой интерес вызывает возможность создания и применения для бездиссипативного транспорта неравновесных магнонных конденсатов, которые, потенциально, могут привести к замене сверхпроводников на изоляторы. Возникают идеи использования для передачи сигналов совсем экзотических коллективных спиновых возбуждений: топологических спиновых текстур – скирмионов. Появились эксперименты по манипулированию отдельными скирмионами, по измерению их массы и скорости. Особенно серьезно вопрос манипулирования коллективными спиновыми возбуждениями стоит в контексте построения топологического квантового компьютера с использованием анионов в дробных состояниях квантового эффекта Холла, таких как $5/2$, $12/5$ и других. Это связано с тем, что практически любая информация о дробных состояниях, доступная для внешнего наблюдателя приходит из измерения проводимости одномерных краевых каналов, так как сам объем двумерной системы является холловским изолятором. Несмотря на то, что в теории двумерных систем существует прямая связь между физикой краевых и объемных состояний, недавние эксперименты по обнаружению дробных состояний $3/2$ и $15/8$ в высокоподвижных AlGaAs/GaAs гетероструктурах ставят под сомнение эту связь [1]. В вышеуказанных экспериментах было выполнено изменение профиля краевых состояний, которое повлекло за собой возникновение в Холловском сопротивлении новых плато при $3/2$ и $15/8$ квантах сопротивления. При этом никаких манипуляций с самой двумерной системой произведено не было. Это, в свою очередь, означает, что соответствие между краевыми и объемными состояниями двумерной системы не столь тривиально. Необходимо развивать новые каналы связи из объема холловского изолятора, в которой планируется проводить топологические квантовые вычисления. Естественным кандидатом на роль переносчика информации из двумерного изолятора выступают долгоживущие спиновые возбуждения.

Авторами работы развиваются оптические методы манипулирования спиновыми возбуждениями в холловских изоляторах. Показано, что в изоляторе с целочисленным фактором заполнения 2 спиновые возбуждения могут переносить сигнал из одной области исследуемого образца в пространственно удаленные области, отделенные от первой области на макроскопические расстояния порядка размера самого образца [2]. Распределение спиновых возбуждений по образцу показывает карту пространственных неоднородностей электронной концентрации, поверхностных дефектов, локальную амплитуду случайного потенциала в холловском изоляторе [3]. Показано также, что аналогичные спиновые возбуждения формируются в окрестности дробного фактора заполнения $3/2$, которое с момента наблюдения рассматривается как один из кандидатов для квантовых вычислений [4].

Предыдущие исследования свойств ансамблей неравновесных спиновых возбуждений были направлены на измерение их квазистатических свойств. Обнаружено, например, что при достижении некоторой критической плотности спиновые возбуждения формируют неравновесное коллективное состояние - магнетофермионный конденсат. Длина пробега спиновых возбуждений в конденсате увеличивается, по крайней мере, на

три порядка величины, а сам конденсат может растекаться на макроскопические площади. Распределение плотности спиновых возбуждений от точки формирования до края распространения конденсата не имеет диффузионного характера [3].

К сожалению, прямой эксперимент по измерению скорости распространения спиновых возбуждений в экспериментах по визуализации растекания спиновых возбуждений не возможен. Профиль распределения плотности возбуждений формируется в течение длительного времени (большая плотность ансамбля спиновых возбуждений образуется не из-за высокой плотности накачки, а из-за сверхдлинных времен жизни последних). Сформировать же ансамбль спиновых возбуждений, растекающийся в пространстве на макроскопические расстояния, из малой по сравнению с длиной растекания области за один импульс накачки, без перегрева электронной системы, не представляется возможным (низкая температура электронной системы – важнейший параметр для реализации квантовых алгоритмов в дробных состояниях КЭХ). В

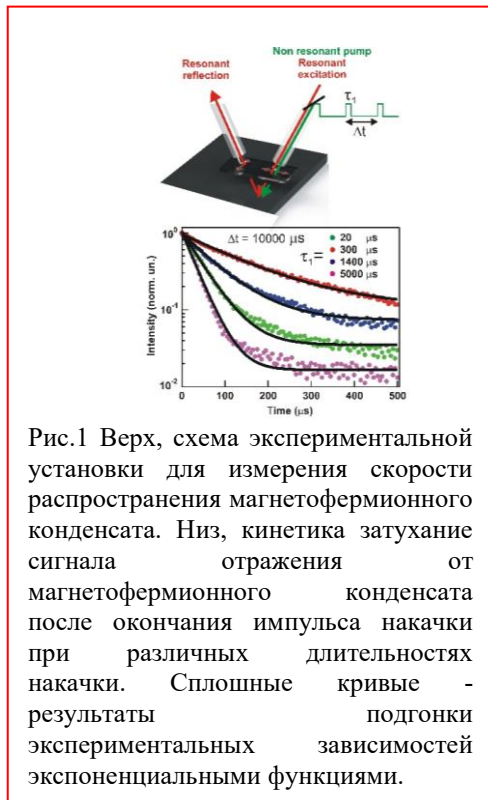


Рис.1 Верх, схема экспериментальной установки для измерения скорости распространения магнетофермионного конденсата. Низ, кинетика затухания сигнала отражения от магнетофермионного конденсата после окончания импульса накачки при различных длительностях накачки. Сплошные кривые – результаты подгонки экспериментальных зависимостей экспоненциальными функциями.

представленной работе мы, впервые, выполнили эксперименты по измерению времени распространения спиновых возбуждений в пространстве холловского изолятора за счет пространственного расширения области оптической накачки и показали, что скорость распространения спиновых возбуждений составляет приблизительно 30 м/с, что близко к скорости распространения магнонов в магнонных конденсатах. Столь высокая скорость распространения спиновых возбуждений в квантующих магнитных полях является совершенно неожиданным результатом (магнитное поле локализует возбуждения в пространстве на размере ларморовской орбиты, а само движение спинового возбуждения распадается на быструю ларморовскую прецессию носителей и медленный дрейф пары носителей в пространстве). Измеряемые скорости распространения спиновых волн в магнетофермионном конденсате делают их реальным кандидатом на перенос сигналов в холловских изоляторах.

Литература

- [1] H. Fu, P. Shan, P. Wang, Z. Zhu, L. N. Pfeiffer, K. W. West, and X. Lin, e-print arXiv: 1702.02403v1.
- [2] L. Kulik, A. Zhuravlev, S. Dickmann, A. Gorbunov, V. Timofeev, I. Kukushkin, and S. Schmult, Nat. Comm. 7, 13499 (2016).
- [3] L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, V. B. Timofeev, I. V. Kukushkin, and S. Schmult, Sci. Rep. 8, 10948 (2018).
- [4] A. S. Zhuravlev, L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, M. A. Khitko, and I. V. Kukushkin, JETP Lett. 108, 419 (2018).
- [5] L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. A. Kuznetsov, and I. V. Kukushkin, Appl. Phys. Lett. 114, 062403 (2019).

Спиновая релаксация в окрестности Холловского ферромагнитного состояния

Л. В. Кулик, В. Е. Кирпичев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Процессы релаксации неравновесного спина в двумерных электронных системах привлекают особое внимание в связи с развитием нового направления прикладной физики - спинтроники. Хорошо известно, что доминирующим механизмом спиновой релаксации без магнитного поля является механизм Дьяконова-Переля. Вследствие спин орбитального взаимодействия Рашбы и Дрессельхауза происходит изменение ориентации спина электрона в зависимости от величины продольного импульса, что приводит к релаксации спина системы. Сильное магнитное поле, перпендикулярное плоскости двумерной электронной системы полностью квантует энергетический спектр, поэтому нужно искать альтернативные механизмы спиновой релаксации. Несмотря на тот факт, что транспортные, оптические и магнитные явления двумерных электронных систем в условиях целочисленного и дробного квантового эффекта Холла хорошо изучены, на данный момент не существует определенной физической модели спиновой релаксации в квантующих магнитных полях. Наблюдаемые времена релаксации спина варьируются от единиц до десятка наносекунд [1], однако на основе существующих экспериментальных данных сложно сделать выбор в пользу определенного релаксационного механизма. Теоретический прогресс в данном направлении более существенен, но из-за разнообразия потенциальных каналов релаксации спина выбор в пользу определенного механизма до сих пор не сделан.

Наиболее полно теоретически разработан случай спиновой релаксации в квантовом Холловском ферромагнетике при заполнении электронами одного спинового подуровня нижайшего уровня Ландау [2]. При этом оценки времени релаксации спиновых экситонов (спиновых возбуждений в Холловском ферромагнетике) варьируются от сотен наносекунд до десятков микросекунд, что на порядки величины превышает экспериментально наблюдаемые значения. Столь серьезное различие экспериментальных и теоретических данных может быть связано, прежде всего, с тем, что прямого измерения времен спиновой релаксации не производилось. В упомянутых выше экспериментах речь идет о времени сбоя фазы спиновой прецессии, которое может быть значительно короче времени энергетической релаксации.

В теории отклонение спиновой системы от равновесия может быть описано, как возникновение спиновых экситонов, состоящих из эффективной дырки в спин-поляризованной электронной системе и неравновесного электрона с противоположным спином. Возникновение одного спинового экситона с ненулевым импульсом приводит к уменьшению спина и проекции спина электронной системы вдоль магнитного поля на единицу. Возникновение спинового экситона с нулевым импульсом аналогичным образом меняет проекцию спина вдоль магнитного поля, но сохраняет полный спин электронной системы, т.е. соответствует повороту полного спина электронной системы относительно направления магнитного поля. В обоих случаях процесс релаксации спина может быть описан в терминах аннигиляции спиновых экситонов. В экспериментах, связанных с созданием неравновесных систем оптическими методами, реализуется ситуация, когда полный спин электронной системы всегда направлен вдоль направления магнитного поля, а его величина отличается от спина равновесной системы. Это означает, что число спиновых экситонов с нулевым импульсом пренебрежимо мало по сравнению с общим числом спиновых экситонов в системе. В этом случае предполагается, что процесс релаксации или аннигиляции спиновых экситонов определяется спин-орбитальным взаимодействием. Кроме того, на эти процессы может оказывать влияние длинноволновый случайный потенциал, всегда присутствующий в двумерных системах.

Принято считать, что когда фактор заполнения увеличивается или уменьшается в окрестности Холловского ферромагнетика (ферромагнетик со спиновыми дефектами), электронные спины организуются в вихреподобные топологические спиновые текстуры – скирмионы (антискирмионы) с целым числом перевернутых спинов. Скирмионы являются результатом конкуренции зеемановской и обменной энергий. В высокоподвижных двумерных системах на основе полупроводниковых структур AlGaAs/GaAs зеемановская энергия довольно значительна, а число перевернутых спинов в скирмионе не превышает четырех. В связи с этим развита теория спин-текстурных квазичастиц (STQ) с несколькими перевернутыми спинами, которые являются квантовым обобщением классических скирмионов. Высказано предположение, что в основном состоянии STQ

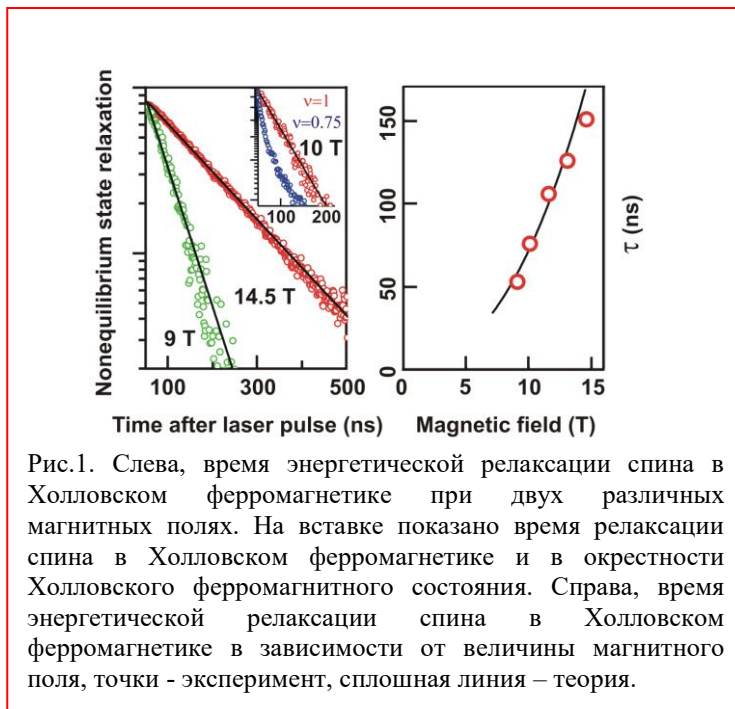


Рис.1. Слева, время энергетической релаксации спина в Холловском ферромагнетике при двух различных магнитных полях. На вставке показано время релаксации спина в Холловском ферромагнетике и в окрестности Холловского ферромагнитного состояния. Справа, время энергетической релаксации спина в Холловском ферромагнетике в зависимости от величины магнитного поля, точки - эксперимент, сплошная линия – теория.

образуют кристаллическую решетку [3]. Однако убедительных доказательств существования скирмионного кристалла в холловском ферромагнетике с заряженными дефектами, образованными либо недостатком, либо избытком электронной плотности, приведено не было. Более того, поставлена под сомнение вся теория STQ в двумерных электронных системах. Оказывается, что физические объекты, аналогичные STQ, существуют в пределе нулевого числа перевернутых спинов. На основании наблюдений спектра спиновых возбуждений с помощью методики неупругого рассеяния света было выдвинуто

предположение, что основным состоянием холловского ферромагнетика с зарядовыми дефектами, является спин-текстурная жидкость [4]. В спектре возбуждений жидкости появляются новые щелевые ветви, связанные с коллективной прецессией электронного спина в эффективном магнитном поле, создаваемым спиновыми текстурами. Новые ветви возбуждений ведут себя аналогично циклотронным возбуждениям, но не во внешнем магнитном поле, а в некоем фиктивном магнитном поле пропорциональном плотности STQ. Соответственно 'эффективная масса' коллективных спиновых возбуждений определяется степенью поляризации электронной системы и величиной обменного взаимодействия [5]. Вопросы релаксации спина в Холловском ферромагнетике, а также влияния спин-текстурных жидкостей на времена релаксации спинов в окрестности Холловского ферромагнетика обсуждаются в представленной работе.

- [1] D. Fukuoka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, and N. Kumada, Phys. Rev. Lett. 105, 126802 (2010).
- [2] S.M. Dikman, S.V. Iordanskii, JETP Lett., 70 (8), 543-549 (1999).
- [3]. R. Cote, A. H. MacDonald, Luis Brey, H. A.Fertig, S. M. Girvin, and H. T. C. Stoof, Phys. Rev. Lett. 78, 4825 (1997).
- [4]. I. K. Drozdov, L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, V. E. Kirpichev, I. V. Kukushkin1, S. Schmult, and W. Dietsche, Phys. Rev. Lett. 104, 136804 (2010).
- [5]. L.V. Kulik, S. Zhuravlev, V.E.Bisti, V.E.Kirpichev, I.V.Kukushkin, Phys. Rev. B 87, 045316 (2013).

Методика время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра как инструмент изучения коллективных спиновых волн в GaAs квантовых ямах с двумерным электронным газом

А. В. Ларионов,* Л. В. Кулик

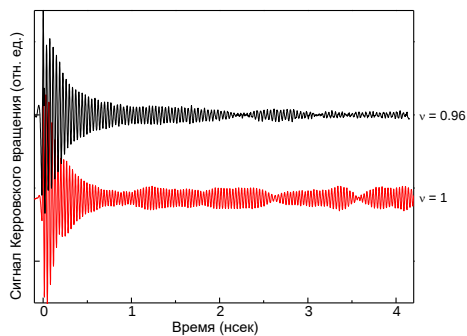
ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: larionov@issp.ac.ru*

Проблема переноса спина магнонами является одной из самых актуальных проблем современной физики с точки зрения замены носителей информации в логических схемах с электронов на спиновые возбуждения. Данная работа посвящена исследованию новых спиновых возбуждений в твердотельных системах.

Исследовались высококачественные полупроводниковые наноструктуры GaAs/AlGaAs с одиночными квантовыми ямами, содержащими высокоподвижный ($\mu \sim 5 \cdot 10^6$ см²/(В*сек)) двумерный электронный газ с концентрацией $n_s = 0.7 \cdot 10^{11}$ см⁻². Изучение спиновой динамики двумерных электронов проводилось с помощью метода время- и спектрально-разрешенного магнито-оптического эффекта Керра с использованием пикосекундного титан-сапфирового лазера. Циркулярно поляризованный импульс накачки создавал в образце спиновую ориентацию двумерных электронов, регистрировавшуюся по углу поворота плоскости поляризации отраженного от образца линейно поляризованного пробного пучка.

Исследуемые образцы помещались в оптический криостат с расщепленным соленоидом под углом 45 градусов по отношению к внешнему магнитному полю, что позволяло, как выбирать необходимый фактор заполнения, так и создавать квантовые спиновые биения двумерных электронов за счет квантования проекции спина электронов (S_z) на направление магнитного поля.



Нами было продемонстрировано, что использование методики накачки-зондирования в геометрии спинового эффекта Керра позволило создавать и наблюдать новый тип спиновых возбуждений — голдстоуновский экситон, который представляет собой когерентный поворот спина всей электронной системы как целого. Спиновая релаксация таких экситонов обеспечивалась механизмом спиновой релаксации, обусловленным пространственными флуктуациями электронного g-фактора.

Показано, что существенным является угол, под которым происходит возбуждение голдстоуновского экситона. При этом угол зависит не от самой геометрии возбуждения спина, а определяется тем, в какое энергетическое состояние происходит возбуждение — в верхний или нижний спиновые подуровни Ландау. Обнаружено, что эффективно голдстоуновский экситон создается только при возбуждении в нижний подуровень Ландау. Это существенно как для фактора заполнения $\nu = 1$, так и $\nu = 3$. Теоретическая оценка времени спиновой релаксации голдстоуновского экситона составляет 10нс (для $\nu = 1$) и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Литература

[1] A. V. Larionov, L. V. Kulik, S. Dickmann, and I. V. Kukushkin, «Goldstone mode stochastization in a quantum Hall ferromagnet», Phys. Rev. B, 92, 165417 (2015).

Эффект антигруппировки фотонов как проявление влияния процесса детектирования света на источник излучения

М. В. Суслов,¹ М. В. Лебедев^{1,2,*}

¹ *Московский физико-технический институт (государственный университет)
Долгопрудный, 141701, Московская обл., Россия*

² *ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*

*e-mail: lebedev@issp.ac.ru

Влияние измерения на измеряемую систему является одним из основных принципов квантовой механики. Строго говоря, это должно быть верно и для процесса детектирования световых квантов. Источник света и детектор фотонов не могут быть рассматриваемы как независимые и всякое детектирование фотона может изменять состояние системы, а с ним и вероятность детектирования следующего фотона. Тем не менее, обычно считается, что обратным влиянием детектора на источник света можно пренебречь ввиду макроскопически большого числа степеней свободы источника света и неконтролируемого взаимодействия атомов источника как между собой, так и с окружением. Хотя эффект антигруппировки фотонов и наблюдается только для одиночных атомов в разреженном атомном пучке или в ловушке, а также для излучения одиночных квантовых точек и, следовательно, число излучающих атомов в этом случае сведено к минимуму, число мод электромагнитного поля, в которые может излучать изолированная система всё ещё остаётся, как правило, макроскопически большим, а влияние окружения часто трудно проконтролировать. В этой связи эффект антигруппировки фотонов, излучаемых изолированной атомной системой, часто находит тривиальное объяснение на языке дискретных квантов энергии. Считается, что после излучения кванта системе требуется некоторое конечное время, чтобы снова прийти в возбуждённое состояние, чем и объясняется пониженная вероятность найти пару фотонов, следующих друг за другом с временным интервалом, меньшим некоторого характерного времени возбуждения излучающей системы. Мы показываем в данной работе, что в случае вероятности регистрации фотона детектором существенно отличающейся от единицы, как это всегда и бывает на практике, эффект антигруппировки не может быть объяснён данной простой моделью и единственной возможностью описать экспериментальные результаты оказывается допущение обратного влияния детектора на источник света.

Экспериментальное изучение перепутанного состояния многомодового электромагнитного поля и излучающей среды

М. В. Лебедев^{1,2,*}

¹*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2*

²*Московский физико-технический институт (государственный университет)
Долгопрудный 141701, Московская обл., Россия*

**e-mail: lebedev@issp.ac.ru*

Наши предыдущие исследования показали наличие сильных корреляций в регистрации фотонов при выделении отдельных мод излучения многомодового полупроводникового лазера, работающего в непрерывном режиме генерации [1]. Подобные корреляции, но не между фотонами, а между интенсивностями отдельных мод излучения непрерывного полупроводникового лазера, были независимо обнаружены ранее и объяснены нелинейным взаимодействием мод в резонаторе лазера [2]. Высокая видность измеренной нами корреляционной функции интенсивностей, непосредственная связь периода осцилляций этой функции с частотой Раби, определяемой током накачки лазера, и хорошее согласие с полностью квантовым описанием [3], позволили нам предположить, что мы имеем дело с макроскопическим квантовым состоянием излучающей среды и электромагнитного поля. Для проверки этого предположения нами были выполнены измерения коррелятора интенсивностей третьего порядка [4], которые показали влияние регистрации одного фотона на вероятность регистрации следующего, то есть подтвердили квантовый характер наблюдаемых явлений. Несмотря на это, хотелось бы получить более прямое доказательство правильности нашей интерпретации, которое не оставило бы возможностей для классического или полуклассического описания. Далее, при наличии такого доказательства возникает задача выяснения основных особенностей исследуемого состояния. Этим вопросам и посвящена данная работа. В ней получено прямое доказательство квантовой природы наблюдаемого состояния и предложен вектор состояния в фоковском представлении.

Литература

- [1] A. A. Demenev, D. R. Domaretskii, A. L. Parakhonsky, and M. V. Lebedev, JETP Lett. **106**, 549 (2017).
- [2] A. M. Yacomotti, L. Furfaro, X. Hachair, F. Pedaci, M. Giudici, J. Tredicce, J. Javaloyes, S. Balle, E. A. Viktorov and P. Mandel, Phys. Rev. A **69**, 053816 (2004).
- [3] H. J. Eleuch, Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys., **41**, 055502 (2008).
- [4] M. V. Lebedev, A. A. Demenev, A. L. Parakhonsky, and O. V. Misochko, "Multimode semiconductor laser: quantum versus classical behavior", J. of Russ. Laser Research **40** (1), 64 (2019).

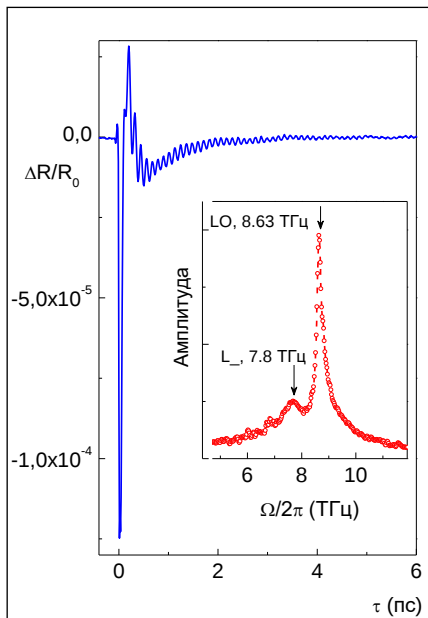
Когерентные терагерцовые фононы и смешанные фонон-плазмонные моды арсенида галлия

О. В. Мисочко*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: misochko@issp.ac.ru*

Связь между продольными оптическими (LO) фононами и плазмонами играет основополагающую роль в определении характеристик приборов на базе легированных полупроводников. Фонон-плазмонное взаимодействие в объемных полупроводниках исследуется уже более полувека и большинство эффектов, связанных с данным взаимодействием, изучено достаточно подробно. Однако успехи лазерных технологий, сократившие длительность лазерного импульса до сотен аттосекунд ($1\text{ас}=10^{-18}\text{с}$), открыли новые перспективы исследований [1]. Столь короткие длительности позволяют не только «приготовить» коллективные возбуждения кристаллической решетки (фононы) и носителей тока (плазмоны) в когерентном состоянии, но и манипулировать ими (когерентный контроль), включая и выключая взаимодействие [2-4].



В данной работе сообщается о сравнительном исследовании зависимости фонон-плазмонного взаимодействия от температуры, типа легирования, и фазы коллективного возбуждения в GaAs с помощью сверхбыстрой когерентной спектроскопии. Типичный, разрешенный во времени, сигнал отражения для р-типа GaAs приведен на рисунке, тогда как на вставке показан фурье спектр когерентного вклада, состоящий из нижней ветви фонон-плазмонной моды и продольного фонона. Понижение температуры от комнатной до гелиевой ведет к росту времени когерентности [5] как фононных, так и смешанных фонон-плазмонных мод вне зависимости от типа легирования. Однако температурные зависимости когерентных амплитуд для р-типа и п-типа GaAs существенно различны, что

объясняется различием глубин обедненного слоя, которое эффективно увеличивает время экранирования поверхностного поля из-за медленной диффузии фотовозбужденных носителей в GaAs р-типа [2]. Также для случая дырочного легирования при помощи когерентного контроля с аттосекундным временным разрешением удастся полностью подавить смешанную L_+ моду, что не реализуется для п-типа GaAs [4]. Такое подавление фонон-плазмонной связи трактуется как «раздевание» квазичастиц (одночастичных электронных возбуждений), возможное только для времен меньших времени создания плазмона [3].

Литература

- [1] For a review, see, e.g., K. Ishioka, and O.V. Misochko, Coherent lattice oscillations in solids and their optical control, Progress in Ultrafast Intense Laser Science, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 23-46 (2010) and references therein.
- [2] J. Hu, H. Zhang, Y. Sun, O.V. Misochko, *et al.*, Phys. Rev. **B 97**(16), 165307 (2018).
- [3] J. Hu, O.V. Misochko, A. Goto, K.G Nakamura, Phys. Rev. **B 86**(23), 235145 (2012).
- [4] S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, *et al.*, Scientific Reports **4**, 4456 (2014).
- [5] O.V. Мисочко, ЖЭТФ **155**(6), 975 (2019).

Когерентный и некогерентный вклады в затухание двумерных плазменных возбуждений

В. М. Муравьев,* И. В. Андреев, В. Н. Белянин

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: muravev@issp.ac.ru

В последнее время большой интерес исследователей вызывает изучение эффектов взаимодействия световых волн с плазменными возбуждениями в двумерных электронных системах (ДЭС). Такой интерес вызван значительным количеством уникальных свойств, отличающих двумерные плазменные поляритоны от их трехмерных аналогов.

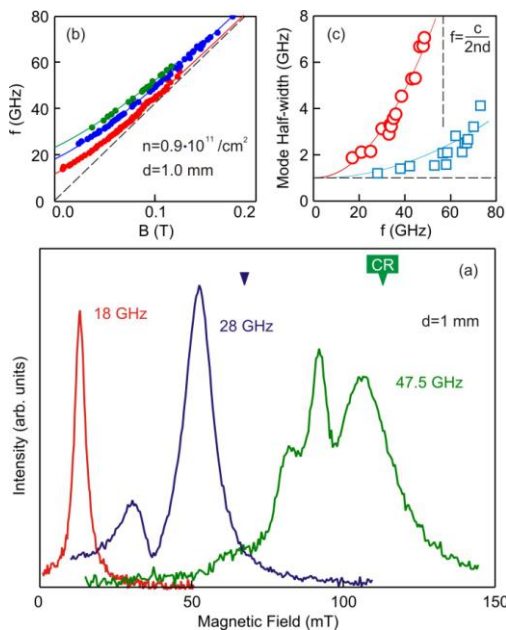


Рис.1. Зависимости интенсивности микроволнового поглощения от магнитного поля для нескольких СВЧ частот.

латерального размера ДЭС определяет основной механизм релаксации магнитоплазменных возбуждений. В случае $d/\lambda \ll 1$ доминирует некогерентный столкновительный механизм, в случае $d/\lambda \gg 1$ - когерентный излучательный.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании РФФИ (грант 18-02-00753).

Литература

- [1] I.V. Kukushkin, J.H. Smet, S.A. Mikhailov et al., Phys. Rev. Lett. 90, 156801 (2003).
- [2] I.V. Kukushkin, V.M. Muravev, J.H. Smet et al., Phys. Rev. B 73, 113310 (2006).
- [3] И. В. Андреев, В. М. Муравьев, В. Н. Белянин, С. И. Губарев, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 102, 938 (2015).

Анизотропия g-фактора электрона в AlAs/AlGaAs квантовых ямах

А. В. Щепетильников, А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: nefyodov@issp.ac.ru

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) был изучен в асимметрично-легированной AlAs/AlGaAs квантовой яме шириной 16 нм, выращенной посредством молекулярно-лучевой эпитаксии вдоль направления [001]. Система двумерных электронов, заключенных в такую квантовую яму, отличается рядом уникальных свойств. Например, эффективная масса электрона в них анизотропна и значительно превышает массу электрона в GaAs. Такая большая эффективная масса приводит к доминированию энергии электрон-электронного взаимодействия над кинетической, а значит, и к значительному возрастанию роли многочастичных эффектов и существенному изменению спиновых свойств такой системы. Современные технологии роста позволяют получать чрезвычайно чистые двумерные электронные системы в AlAs квантовых ямах. В таких системах наблюдается не только целочисленный, но и дробный квантовые эффекты Холла. Так в исследованной структуре плотность двумерных электронов составляла $1.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а подвижность достигала $2 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при температуре в 1.5 К.

Электронный спиновый резонанс детектировался по резкому изменению продольного сопротивления двумерной электронной системы при поглощении излучения микроволнового частотного диапазона. Удивительным образом ЭПР детектировался также и в случае магнитного поля параллельного плоскости квантовой ямы. В таких условиях не наблюдаются осцилляции

Шубникова – де Гааза и, как следствие, чувствительность сопротивления образца к обусловленному поглощением электромагнитного излучения значительно снижена.

Возможность наблюдения спинового резонанса при магнитном поле параллельном плоскости двумерной системы позволило измерить плоскостную анизотропию g-фактора электрона с большой точностью. При условии, что компонента магнитного поля была направлена вдоль кристаллографических осей [110] или [1-10] наблюдался один резонансный пик ЭПР. При других ориентациях магнитного поля в плоскости пик ЭПР расщеплялся на два хорошо различимых пика. Данное экспериментальное наблюдение свидетельствует о том, что обе плоскостные долины в X-точка зоны Бриллюэна заселены электронами, и каждая из этих долин характеризуется анизотропным g-фактором. Главные оси и главные значения тензоров g-фактора были измерены для каждой из долин. Итоговая зависимость эффективного g-фактора электрона для каждого из двух расщепленных пиков спинового резонанса от угла между магнитным полем и направлением [110] показана на рис. 1.

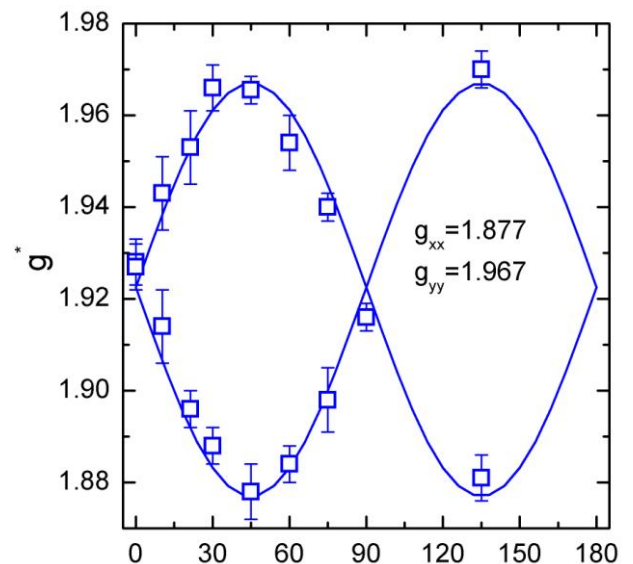


Рис. 1. Зависимость эффективного g-фактора электрона для каждого из двух расщепленных пиков спинового резонанса от угла между магнитным полем и направлением [110]. Магнитное поле параллельно плоскости двумерной системы.

Перенормировка эффективной массы, задающей период осцилляций сопротивления гетероструктур GaAs/AlGaAs, вызванных микроволновым излучением

Ю. А. Нефёдов, * А. В. Щепетильников, Д. Д. Фролов

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: nefyodov@issp.ac.ru*

При облучении качественных двумерных электронных структур микроволновым излучением в продольном магнитосопротивлении появляются осцилляции. Эти осцилляции периодичны по обратному магнитному полю, а их период определяется соизмеримостью микроволновой частоты и циклотронной энергии. Обнаружение этого явления дало мощный толчок как экспериментальным, так и теоретическим исследованиям. Несмотря на то, что был достигнут заметный прогресс в понимании этого явления, некоторые его аспекты требуют дополнительных исследований. Следует особо отметить, что масса m^* , извлекаемая из периода осцилляций сопротивления, несколько меньше, чем циклотронная масса, причем их разница существенно превышает ошибки измерения обоих методов. В этой работе мы экспериментально исследовали причины данного расхождения.

Вызванные микроволновым излучением осцилляции сопротивления были исследованы в нескольких квантовых ямах на основе GaAs/AlGaAs. Образцы отличались концентрацией двумерных носителей n . Эффективная масса m^* извлекалась из периода осцилляций и демонстрировала сильную немонотонную зависимость от концентрации. При низких концентрациях значение m^* оказалось заметно выше величины циклотронной массы и резко падало при увеличении n . Такое поведение явно указывает на влияние многочастичных эффектов на перенормировку массы. Минимальное значение m^* наблюдалось при умеренных значениях концентрации и было меньше циклотронной массы в полном соответствии с более ранними работами. Небольшое увеличение m^* при дальнейшем росте концентрации может быть объяснено эффектами непараболичности зоны проводимости GaAs.

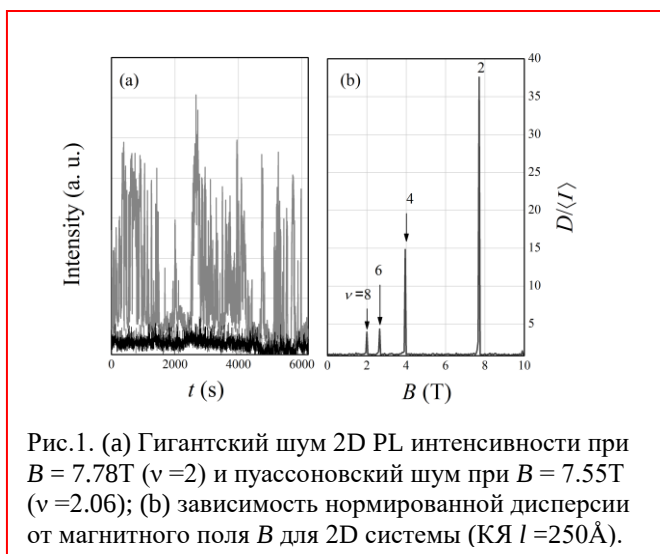
Формирование макроскопического однородного состояния 2D электронов в режиме КЭХ

А. Л. Парахонский, * М. В. Лебедев, А. А. Дремин, И. В. Кукушкин

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: alpar@issp.ac.ru*

Флуктуации физических параметров в низкоразмерных полупроводниковых системах при определенных условиях возбуждения электронной подсистемы, могут быть признаком образования сильно коррелированного состояния. Эффект гигантских



оптических флуктуаций (ГОФ) в структурах с GaAs/AlGaAs КЯ (2D) в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) показывает принципиальную возможность получения данных о свойствах электронной квантовой жидкости из флуктуаций оптического отклика квантово-механической системы [1]. Выявлено действие в 2D системе механизмов, определяющих согласованное протекание процессов излучательной рекомбинации (PL) на макроскопических расстояниях (1-10 мм). Отношение дисперсии к средней PL интенсивности $\sigma = [\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2] / \langle I \rangle = D / \langle I \rangle$ существенно превышает пуассоновский шум ($\sigma \gg 1$) (Рис.1а).

пуассоновский шум ($\sigma \gg 1$) (Рис.1а).

Это характерно для целых четных факторов ν заполнения уровней Ландау при температурах $T < 2\text{К}$ (Рис.1b) и для $\nu = 1$ и дробных ν при более низких T . 2D система рассматривается с точки зрения ее пребывания в одном из двух излучающих состояний: с однородной плотностью электронов и неоднородном состоянии. Сравнение систем с широкой (250 Å) и узкой (120 Å) КЯ с близкими концентрациями и подвижностями 2D электронов выявило разный масштаб корреляций электронной плотности в 2D канале, характеризующих обмен электронами между соседними 2D областями и влияющих на оптический спектр.

Литература

[1] A.L. Parakhonsky, M.V. Lebedev, A.A. Dremin, I.V. Kukushkin, "A highly ordered radiative state in a 2D electron system", Chapter in book: Research Advances in Quantum Dynamics, Edition: University of Texas, Edinburg, TX, Chapter: 5, Publisher: InTech, Editors: Paul Bracken, pp.93-109 (2016).

Изучение спиновых текстур в GaAs квантовых ямах с двумерным электронным газом с помощью время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра

Э. Степанец-Хуссейн,* А. В. Ларионов

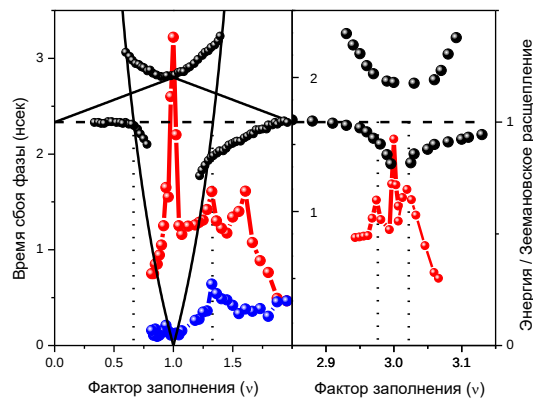
ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: eldar.stepanets@yandex.ru

Проблема управления спиновыми степенями свободы является одной из самых актуальных проблем современной физики с точки зрения замены носителей информации в логических схемах с электронов на спиновые возбуждения. Данная работа посвящена исследованию новых спиновых возбуждений в твердотельных системах.

Методом время-разрешенного магнито-оптического эффекта Керра исследованы полупроводниковые наноструктуры с двумерным электронным газом в GaAs/AlGaAs квантовых ямах в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.

Была изучена зависимость времени спиновой дефазировки двумерных электронов в области факторов заполнения, где существенную роль в релаксации спина должны играть спиновые текстуры. Обнаружено, что вблизи фактора заполнения $\nu = 1$ со стороны больших факторов заполнения наблюдаются два дополнительных эквидистантно расположенных максимума времени сбоя фазы спиновой прецессии двумерных электронов. Возрастание времени дефазировки наблюдалось в окрестности энергетического резонанса спинового экситона и возбуждений спин-текстурной жидкости. Поэтому можно считать, что в механизме дефазировки спинового голдстоуновского экситона вблизи целочисленных факторов заполнения важную роль играют спиновые возбуждения спин-текстурных жидкостей. Неожиданным является то, что вблизи фактора заполнения $\nu = 1$ наблюдался не один, а два дополнительных эквидистантных максимума, удаленных от главного целочисленного максимума. Похожая картина имела место для поведения времени дефазировки в окрестности фактора заполнения $\nu = 3$. Дополнительные максимумы расположены симметрично относительно максимального времени точно при $\nu = 3$.



Литература

- [1] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, V.E. Kirpichev, V.E. Bisti, and I.V. Kukushkin, «Collective spin precession excitations in a two-dimensional quantum Hall ferromagnet», Phys. Rev. B, 87, 045316 (2013).
- [2] А.В. Ларионов, Э. Степанец-Хуссейн и Л.В. Кулик, «Спиновая дефазировка двумерного электронного газа в GaAs квантовой яме в окрестности нечетных факторов заполнения», Письма в ЖЭТФ, т. 105, вып. 4, стр. 219-222 (2017).

Особенности формирования пространственной когерентности в экситон-поляритонной системе при резонансной оптической накачке

С. Н. Терешко*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: tereshko.sn@phystech.edu*

Квазидвумерные экситонные поляритоны в полупроводниковых микрорезонаторах (МР) формируются из экситонов и фотонов в режиме их сильного взаимодействия. Вследствие очень малой эффективной массы ($\sim 10^{-5}m_e$) система поляритонов уже при сравнительно низких плотностях 10^{10} - 10^{11} см $^{-2}$ и высоких температурах (вплоть до комнатной в МР на основе ZnO и GaN) демонстрирует формирование макроскопически-когерентного состояния в условиях межзонного возбуждения. При этом, порождающий поляритонный конденсат плотный резервуар долгоживущих экситонов является и основным источником декогеренции в системе [1].

В настоящей работе, для возбуждения поляритонов в широкой области k -пространства использовались 2-пс лазерные импульсы ($\Delta E \approx 1.5$ мэВ) с широкой угловой апертурой. В результате возбуждался “горячий” некогерентный поляритонный газ, в котором конденсация в $k=0$ могла бы происходить через межчастичные взаимодействия. Оказалось, что при $T = 2$ К в широком интервале накачек поляритонная система не демонстрирует конденсации: Δk не меньше 1 мкм $^{-1}$ и L_c не больше 6 мкм на протяжении всей эволюции (рис.1). Повышение температуры существенно меняло ситуацию: Δk сужалось в 5 раз до 0.4 мкм $^{-1}$, а длина когерентности увеличивалась до 12 мкм, что уже близко к соответствующим значениям в условиях межзонной накачки. Таким образом, межполяритонное взаимодействие не приводит к образованию доминирующего состояния с $k=0$. Для конденсации необходимо взаимодействие с резервуаром энергии, в роли которого, при межзонном возбуждении, выступают долгоживущие экситоны.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] A.A. Demenev, Ya.V. Grishina, S.I. Novikov, V.D. Kulakovskii, C. Schneider, S. Hofling, Phys. Rev. B. 94, 195302 (2016).

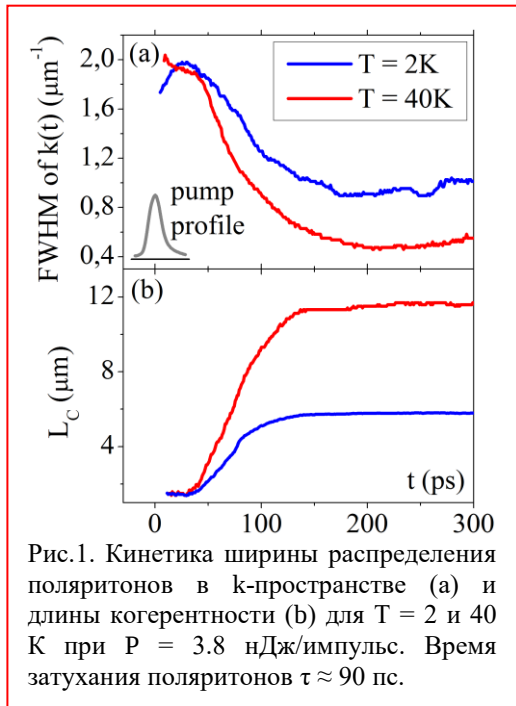


Рис.1. Кинетика ширины распределения поляритонов в k -пространстве (a) и длины когерентности (b) для $T = 2$ и 40 К при $P = 3.8$ нДж/импульс. Время затухания поляритонов $\tau \approx 90$ пс.

Комбинированный диэлектрический и плазмонный резонанс для гигантского усиления рамановского рассеяния света

В. И. Кукушкин,^{1,2*} Я. В. Гришина,¹ В. В. Соловьев,¹ И. В. Кукушкин¹

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

²Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И.И.Мечникова, 105064 Москва, Россия

*e-mail: kukush@issp.ac.ru

Разработаны и исследованы свойства комбинированных диэлектрических и

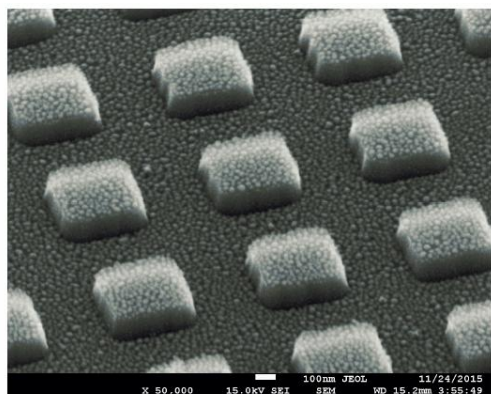


Рис.1. Фотографии SERS-структур с диэлектрическими и металлическими резонаторами, полученные на электронном микроскопе.

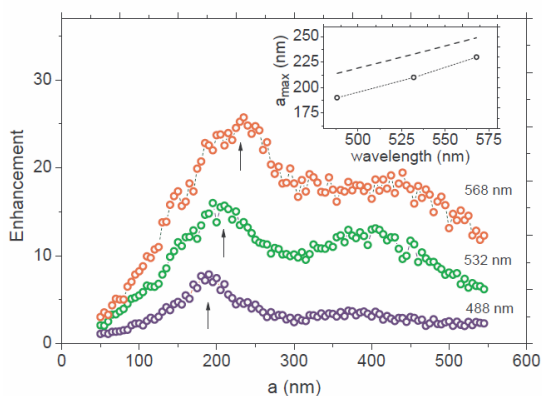


Рис.2. Зависимость коэффициента дополнительного SERS – усиления за счет диэлектрического резонатора от планарного размера кварцевого столбика, измеренная при высоте столбика 130 нм. Длина волны лазера 532 нм.

металлических резонаторов (рис. 1), предназначенных для получения колоссального усиления сигнала неупругого рассеяния света. Показано, что коэффициент усиления при этом достигает рекордных значений $2 \cdot 10^8$. Диэлектрические резонаторы создавались на подложках Si/SiO₂, в которых с помощью электронной литографии и плазменного травления изготавливались периодические структуры (диэлектрические квадратные столбики высотой 10 нм - 200 нм) с планарным размером a (и периодом $2a$), который изменялся в интервале от 50 нм до 1500 нм. Для создания комбинированного диэлектрического и металлического резонатора на изготовленную периодическую диэлектрическую структуру методом термического напыления наносился наноструктурированный слой серебра. Установлено, что при фиксированной высоте диэлектрических столбиков наблюдаются яркие осцилляции коэффициента усиления рамановского сигнала в зависимости от периода (и планарного размера) столбиков. Показано, что обнаруженные осцилляции усиления рамановского сигнала определяются модами диэлектрического резонатора и задаются соотношением между длиной волны накачивающего лазера и планарным размером диэлектрического столбика (рис. 2).

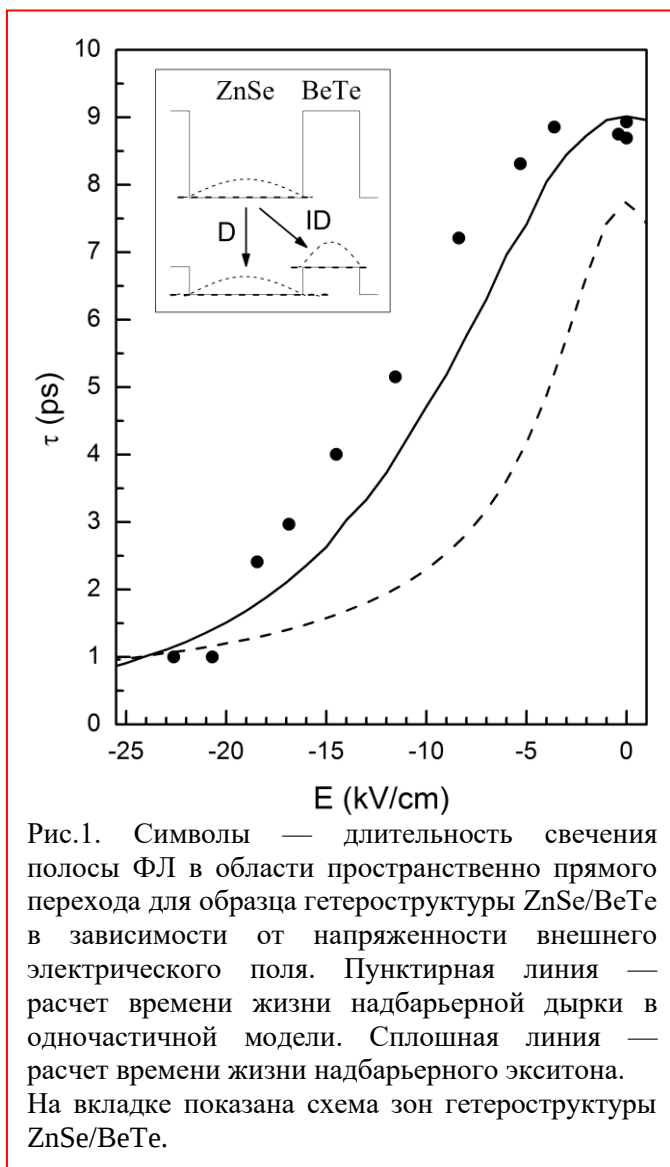
Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

Влияние внешнего электрического поля на динамику релаксации надбарьерного экситона в гетероструктурах ZnSe/BeTe

Е. В. Филатов,* А. А. Максимов, И. И. Тартаковский

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: filatov@issp.ac.ru



В работе исследовано влияние внешнего электрического поля на динамику релаксации фотовозбужденных электронов и дырок в гетероструктуре ZnSe/BeTe с толщинами слоев $L_{\text{ZnSe}} = 20$ нм и $L_{\text{BeTe}} = 10$ нм.

Пары электронов и дырок возбуждались в слое ZnSe 2-й гармоникой фемтосекундного Ti:Sa лазера. Фотолюминесценция (ФЛ) в области пространственно прямого перехода (2.8 эВ) регистрировалась с помощью стрик камеры, включенной в режиме синхронного сканирования, что обеспечивало временное разрешение 2 пс.

По измерениям длительности свечения полосы ФЛ в области пространственно прямого перехода были определены времена жизни надбарьерной дырки в слое ZnSe (символы на рис. 1). Обнаружено, что приложение внешнего электрического поля с напряженностью $E = 20$ кВ/см приводит к уменьшению времени жизни надбарьерной дырки на порядок — с 9 до 1 пс. Эффект связан с увеличением вероятности релаксации надбарьерной дырки из слоя ZnSe в основное состояние в слое BeTe при наклоне зонной структуры.

Было предложено две модели для объяснения наблюдаемых изменений времени жизни надбарьерной дырки. В рамках одночастичной модели (пунктирная линия на рис. 1) рассматривалась задача о скорости релаксации дырки, локализованной над одиночным барьером ZnSe. Эта модель позволила лишь качественно объяснить данные эксперимента. Количественное согласие было получено при рассмотрении связанного состояния электрона и дырки в слое ZnSe — экситона (сплошная линия на рис. 1). Взаимодействие надбарьерной дырки с локализованным в слое ZnSe электроном приводит к более пологой характеристике времени жизни надбарьерной дырки в области низких напряженностей электрического поля ($E < 5$ кВ/см), что согласуется с данными эксперимента.

Экспериментальные исследования плазменных возбуждений и аномального эффекта запаздывания в двумерной системе анизотропных фермионов

А. Р. Хисамеева, А. В. Щепетильников

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

В работе впервые экспериментально исследовались спектры плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерной системе тяжелых анизотропных фермионов на основе квантовых ям (КЯ) AlAs/AlGaAs.

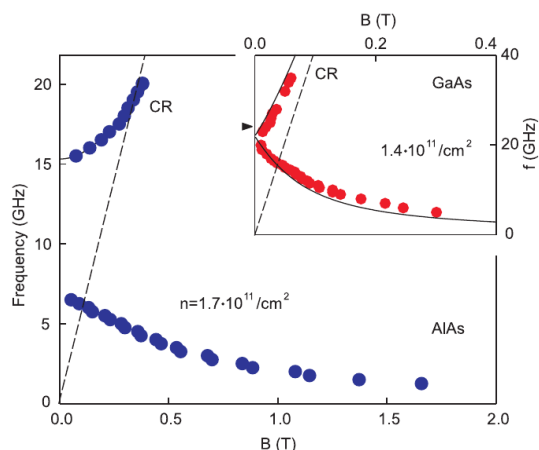


Рис. 1. Магнетодисперсия двумерных плазменных возбуждений в AlAs/AlGaAs квантовых ямах в геометрии диска. На вставке показана дисперсия плазменных волн в изотропной ДЭС на основе GaAs.

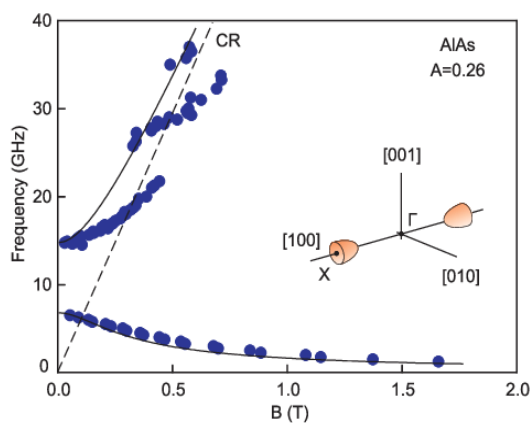


Рис. 2. Спектр магнитоплазменных возбуждений в AlAs при $n_s = 1.70 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (параметр запаздывания $A = 0.26$).

Образцы представляли собой копланарный волновод, в щелях которого располагались диски с ДЭС [1]. В спектре микроволнового поглощения [Рис.1] при пониженной концентрации, когда заполнена одна наинижайшая анизотропная долина, наблюдались две магнитоплазменные моды, разделенные щелью по частоте в нулевом магнитном поле. Каждому их резонансов соответствует своё значение эффективной массы ($1,10 \pm 0,05$) m_0 и ($0,20 \pm 0,01$) m_0 [2]. При увеличении концентрации происходило заселение второй долины, что приводило к резкой модификации спектра. Коллективные возбуждения в такой системе могут быть рассмотрены в модели двухкомпонентной анизотропной плазмы. Непосредственно были определены электронные плотности в каждой долине и энергия междолинного расщепления ΔE .

Также в эксперименте наблюдалась сильное проявления эффектов запаздывания: уменьшение резонансной плазменной частоты и более пологая зависимость, по сравнению с теорией. Примечательно, что фундаментальная мода и кратные гармоники пересекают линию циклотронного резонанса. Однако наблюдаемая сильная гибридизация плазменной циклотронной и световой мод пропадает при приложении внешней одноосной деформации, когда внутреплоскостные долины выровнены между собой. Для подтверждения поляритонной природы наблюдаемого явления, мы также исследовали концентрационную зависимость.

Полученные результаты открывают новый путь для повышения эффективности современных детекторов и источников терагерцового и субтерагерцового излучения.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

[1] V. M. Muravev et al., Phys. Rev. B 92, 041303(R) (2015).

[2] M. Shayegan, et al., Phys. Stat. Sol. (b) 243, No. 14, 3629-3642 (2006).

Оптическое наблюдение магнитоплазменных резонансов в непрямозонных квантовых ямах AlAs/AlGaAs

А. Р. Хисамеева, С. И. Губарев, В. М. Муравьев

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

В настоящей работе исследовались магнитоплазменные резонансы в высококачественных гетероструктурах AlAs/AlGaAs. Эксперименты проводились на одиночной микроструктуре в форме диска посредством оптического детектирования микроволнового резонансного поглощения (ОДМП). AlAs является непрямозонным полупроводником и данная методика была впервые применена к таким двумерным электронным системам (ДЭС) [1].

Люминесценция, обусловленная рекомбинационным излучением двумерных электронов с фотовозбужденными носителями, отсутствует в ДЭС на основе AlAs. Поэтому в эксперименте в качестве пробной исследовалась линия примесного центра в барьере AlGaAs с характерной энергией 1.93 эВ, так как её интенсивность была восприимчива к изменениям температуры в ДЭС, обусловленным поглощением СВЧ излучения при возбуждении магнитоплазменного резонанса. Основным преимуществом ОДМП методики перед копланарной является то, что в исследуемых структурах отсутствуют контакты и затворы, которые могут вносить возмущение в электромагнитное поле плазменной волны

[2]. На Рис. 1а показаны спектры магнитоплазменных возбуждений, полученные при помощи оптической (красная кривая) и копланарной (синяя) методик. Сравнительные магнитополевые зависимости для частоты $f = 29$ ГГц (Рис. 2б) имеют одинаковые резонансный плазменный контур и положение по магнитному полю. Также результаты экспериментов продемонстрировали сильное расхождение между поведением циклотронной магнитоплазменной моды и теорией. Данное явление может быть связано с более сильным проявлением эффектов запаздывания в ДЭС, вследствие анизотропного энергетического спектра.

Данный результат открывает широкую перспективу использования данного метода для исследования других непрямозонных полупроводников.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

[1] A. R. Khisameeva et al., JETP Letters, 106:1, 26–29 (2017).

[2] A. R. Khisameeva et al., Phys. Rev. B, **97**, 115308 (2018).

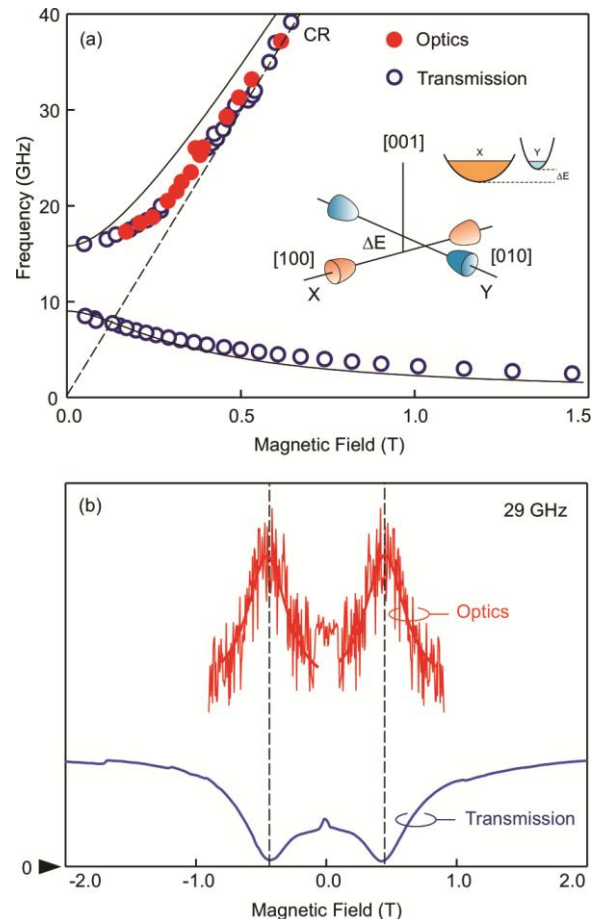


Рис. 1. (а) Спектры магнитоплазменных возбуждений; (б) сравнительные магнитополевые зависимости для двух методик

Оптическое детектирование магнитоплазменных возбуждений в MgZnO/ZnO гетеропереходах

А. Р. Хисамеева,* А. А. Дремин, А. А. Фортунатов, В. М. Муравьёв

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

**e-mail: akhismeeva@issp.ac.ru*

В данной работе были исследованы магнитоплазменные возбуждения в одиночном гетеропереходе MgZnO/ZnO методом оптического детектирования микроволнового резонансного излучения [1,2]. Изучения новых двумерных систем на основе ZnO представляют большой интерес для прикладного использования, благодаря более высоким энергиям оптического перехода, величинам электрического поля пробоя и скорости насыщения по сравнению с Si и GaAs.

На Рис. 1 (b) показана зависимость частоты магнитоплазменного резонанса от магнитного поля для гетероперехода MgZnO/ZnO. Как и в случае гетероструктур AlGaAs/GaAs (Рис. 1(a)) краевая и объёмная моды вырождены в нулевом магнитном поле $B = 0$ Тл из-за изотропности эффективной массы электронов в обоих ДЭС. Однако, полученное значение эффективной массы $m_c = 0.317 m_0$ из циклотронного анализа значительно превосходила массу в GaAs. На вставках к Рис. 1 показано, что ширины плазменных резонансов в структурах ZnO в несколько раз уступают значениям в GaAs КЯ, но подвижность остаётся достаточно высокой для изучения новых физических эффектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-72-30003).

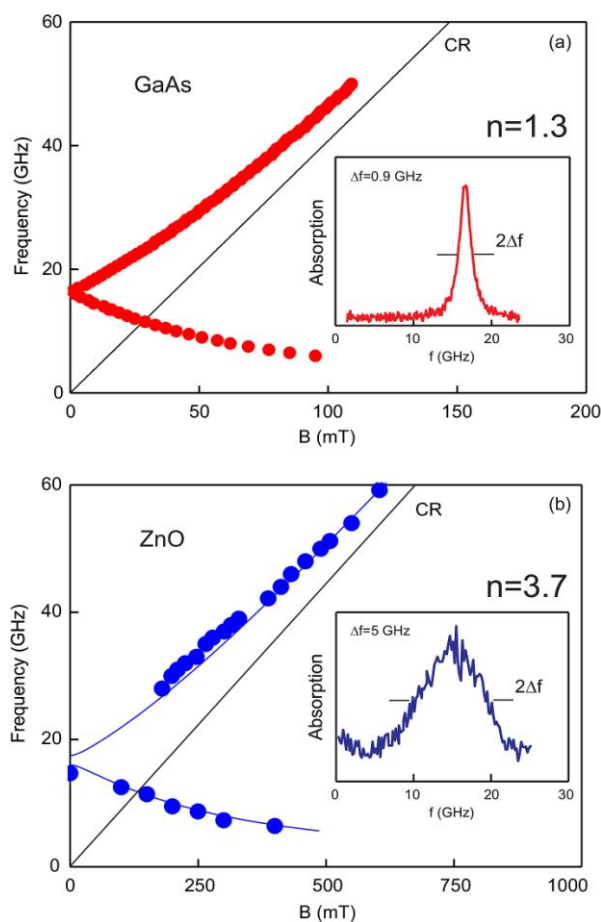


Рис. 1. (a) Спектр магнитоплазменных возбуждений в GaAs КЯ с изотропной эффективной массой. (b) Магнитодисперсия в гетеропереходе MgZnO/ZnO с тяжелой изотропной массой. На вставках: контуры плазменных возбуждений в фиксированном магнитном поле при развороте частоты

Литература

- [1] В. Е. Козлов et al., JETP Letters, 98, вып. 4, с 251–254 (2013).
- [2] V. E. Kozlov et al., Phys. Rev. B, 91, 085304 (2015).

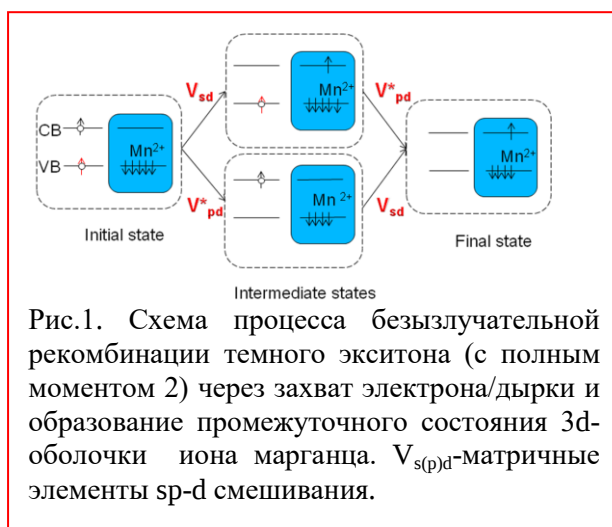
Механизмы безызлучательной передачи возбуждения ионам марганца в II-VI полумагнитных квантовых точках

А. В. Черненко*

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: chernen@issp.ac.ru

Допирование марганцем объемных полупроводников группы II-VI и низкоразмерных структур на их основе приводит к эффективному тушению электро- и фотолюминесценции при условии, что энергия электронного возбуждения кристалла превышает энергию внутрицентрового перехода иона Mn^{2+} $E_{\text{Mn}} \approx 2.1$ эВ [1,2]. Внутрицентральный дипольный переход ${}^4\text{T}_{1(2)} \rightarrow {}^6\text{A}_1$ в Mn^{2+} запрещен правилами отбора как по спину, так и по орбитальному моменту, но кристаллическое поле и спин-орбитальное взаимодействие делают этот переход слабозапрещенным, что объясняет длинные времена жизни возбужденных состояний $\text{Mn}^{2+} > 100$ мксек. В этих условиях доминирующую роль может играть обменный механизм, который, в отличие от диполь-дипольной передачи возбуждения, является спин-зависимым. Однако, кроме прямого обменного механизма, возможен косвенный обменный механизм, связанный со специфической для полумагнитных полупроводников II-VI sp-d гибридизацией.



В докладе предложена квантовомеханическая модель системы, состоящей из одиночной квантовой точки, содержащей не взаимодействующие между собой ионы марганца. Такая система описывается гамильтонианом типа гамильтониана Андерсона, который учитывает смешивание (гибридизацию) локализованных и зонных электронных состояний.

Суть последнего механизма поясняет схема на рис.1, где рассматривается рекомбинация «темного» экситона с проекцией полного момента на ось Oz $J_z = 2$ через возбуждение иона марганца Mn^{2+} с проекцией полного спина $S_z = -5/2$, являющегося основным для системы ион Mn^{2+} + темный экситон в магнитном поле $B \parallel Oz$. Возбуждение иона марганца происходит через последовательный захват электрона/дырки на промежуточный уровень 3d-оболочки марганца, что приводит к рекомбинации экситона и переходу марганца в возбужденное состояние в соответствии с законом сохранения проекции спина системы в данном процессе на ось Oz.

Литература

- [1] A.V. Chernenko et al, J. Phys.: Condens. Matter 22, 355306(2010).
- [2] А.В. Черненко, ФТП, 49, 1629 (2015).

Особенности конденсации поляритонов в микрорезонаторных микро столбиках в сильных магнитных полях

А. В. Черненко*

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: chernen@issp.ac.ru

В работе исследована фотолюминесценция (ФЛ) неравновесного конденсата поляритонов в микро столбиках (МС) микрометровых размеров цилиндрической и прямоугольной форм, вытравленных на поверхности высокочастотного микрорезонатора на основе GaAs в магнитном поле до 12 Тл. Измерения проводились при температуре $T=2$ К, в диапазоне расстроек от $\delta=-8$ до $+1$ мэВ и различных уровнях оптической накачки наносекундными импульсами лазера с длиной волны 532 нм. Нерезонансное возбуждение создаёт значительную плотность экситонов в резервуаре, что позволяет ожидать существенного влияния экситон-поляритонного взаимодействия, которое зависит от плотности накачки, на величину зеемановского расщепления и степень поляризации ФЛ конденсата поляритонов. В частности, наблюдаемая ранее смена знака циркулярной поляризации, наблюдаемая и зеемановского расщепления, могли бы быть вызваны этим взаимодействием, как было предположено в [1]. Однако измерения продемонстрировали лишь незначительное изменение зеемановского расщепления в сильных магнитных полях, т.е. экспериментальные результаты не подтвердили этого предположения. Кроме того, полученные данные позволили оценить плотность экситонов в резервуаре в предположении, что в системе экситонов успевает установиться термодинамическое равновесие. Плотность оказалась достаточно низкой, менее 10^9 см^{-2} , тогда как оценка плотности поляритонов в конденсате, полученная из этих данных, даёт величину $\sim 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Спектры ФЛ прямоугольных МС принципиально отличаются от спектров цилиндрических МС: они состоят из двух линейно взаимоперпендикулярно поляризованных линий, причём степень линейной поляризации превышает 90%. Необычным является то, что эти линии соответствуют поляритонам, принадлежащим несоседним по энергии модам размерного квантования. ФЛ прямоугольных МС демонстрирует сравнимое с цилиндрическими МС зеемановское расщепление при отсутствии его зависимости от накачки, что связано с особенностями квантования поляритонных уровней в этом случае. В тоже самое время степени циркулярной и линейной поляризаций прямоугольных МС зависят от накачки и их поведение хорошо описывается простой моделью, которая учитывает только поляритон-поляритонное взаимодействие.

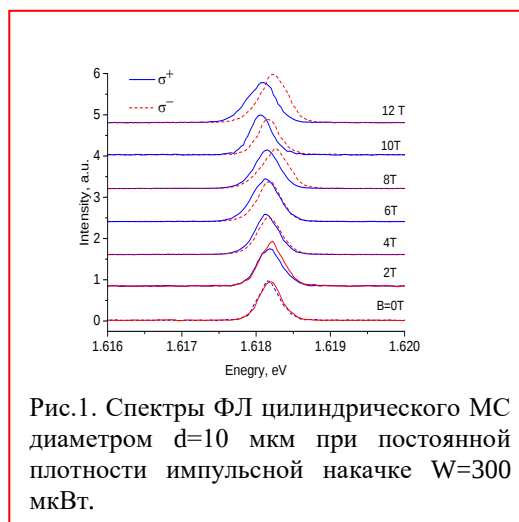


Рис.1. Спектры ФЛ цилиндрического МС диаметром $d=10$ мкм при постоянной плотности импульсной накачке $W=300$ мкВт.

Литература

- [1] C. Sturm, D. Solnyshkov, O. Krebs et al., Phys.Rev. B 91, 155130 (2015)

Спиновая динамика ядер в AlAs/AlGaAs квантовых ямах

А. В. Щепетильников,* А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нефёдов*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru*

Динамика ядерных спинов была изучена в [001] AlAs/AlGaAs квантовой яме шириной 16 нм, содержащей высококачественную двумерную электронную систему. Такая система имеет ряд исключительных свойств. Например, эффективная масса электрона в них анизотропна и значительно превышает массу электрона в GaAs. Данная особенность приводит к доминированию энергии электрон-электронного взаимодействия над кинетической, а значит, и к значительному возрастанию роли многочастичных эффектов и существенному изменению спиновых свойств такой системы. Современные технологии роста позволяют получать чрезвычайно чистые двумерные электронные системы в AlAs квантовых ямах. В таких системах наблюдается не только целочисленный, но и дробный квантовые эффекты Холла. Так в исследованной структуре плотность двумерных электронов составляла $1.8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а подвижность достигала $2 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при температуре в 1.5 К.

Методика детектирования спинового резонанса основывалась на чрезвычайно большой чувствительности продольного сопротивления двумерного канала к поглощению микроволнового излучения в режиме квантового эффекта Холла.

Спиновая динамика ядер вблизи двумерной электронной системы в AlAs-квантовой яме измерялась экспериментально посредством методики ЭПР. Начальная ненулевая спиновая поляризация ядерной подсистемы формировалась в ходе релаксации неравновесных спинов электронов вблизи спинового резонанса электронов в ядерную подсистему за счет сверхтонкого взаимодействия. При этом возникал сдвиг Оверхаузера спинового резонанса. Размагничивание ядерных спинов радиочастотным излучением вызывало резонансное уменьшение сдвига Оверхаузера, что позволяло эффективно детектировать ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Эксперименты по ЯМР позволили определить, что только спин ^{75}As взаимодействует с двумерной электронной системой. Время спиновой релаксации ядер было измерено по затуханию сдвига Оверхаузера парамагнитного резонанса электронов проводимости. Измеренное время демонстрировало сильную зависимость от фактора заполнения электронной системы: было максимально при факторе $= 1$ и убывало при отходе от единичного фактора заполнения. Указанное значение более чем на порядок превышает характерные времена релаксации ядер в GaAs/AlGaAs гетероструктурах.

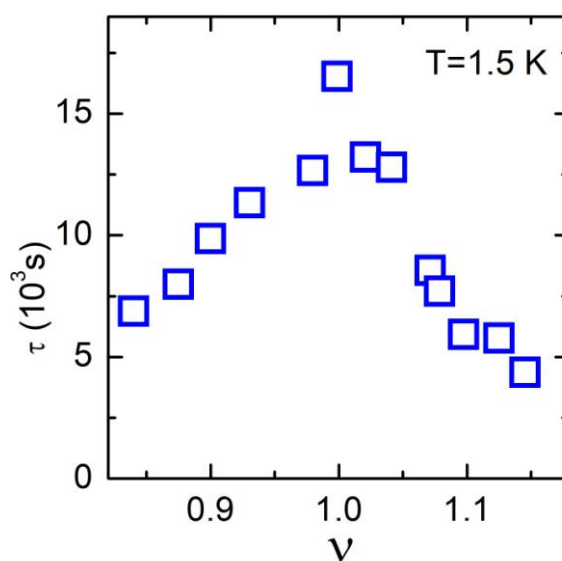


Рис. 1. Зависимость времени спиновой релаксации ядер вблизи единичного фактора заполнения двумерной электронной системы.

Влияние инжекции спин-поляризованного тока и магнитного поля на дифференциальное сопротивление гибридных SNFS структур.

Т. Е. Голикова,^{1,2*} Г. А. Пензяков,¹ И. Е. Батов,¹ D. Beckmann,² В. В. Рязанов¹

¹ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

²Institute of Nanotechnology, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

*e-mail: golt2@list.ru

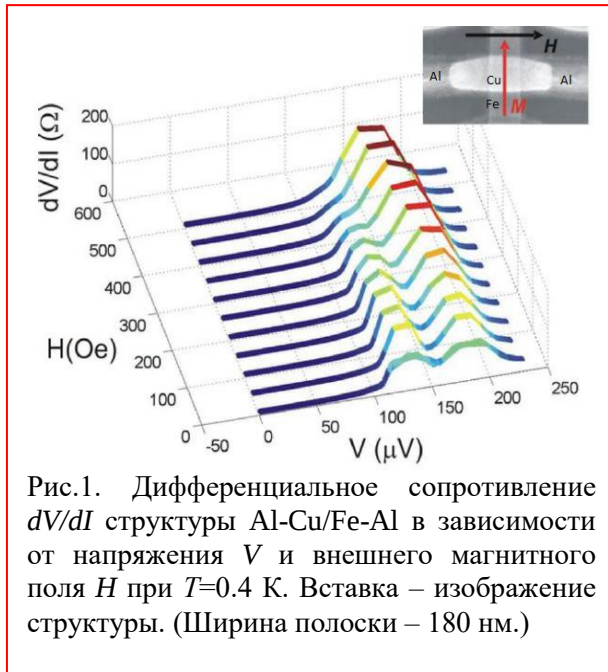


Рис.1. Дифференциальное сопротивление dV/dI структуры Al-Cu/Fe-Al в зависимости от напряжения V и внешнего магнитного поля H при $T=0.4$ К. Вставка – изображение структуры. (Ширина полоски – 180 нм.)

Исследованы транспортные свойства субмикронных гибридных структур SNFS на основе алюминия (S), меди (N) и железа (F) при низкой температуре и в магнитном поле. При помощи электронной литографии на двойном резисте и последующего теневого осаждения под 3 углами были изготовлены структуры Al-Cu/Fe-Al с ферромагнитным контрольным электродом, перпендикулярным слабой связи N/F (вставка на Рис. 1) по аналогии с [1]. Этот электрод использовался для инжекции спин-поляризованного тока.

Исследуемые структуры проявляли сверхпроводящие свойства при базовой температуре (0.4 К), в том числе и эффект Джозефсона. На дифференциальном сопротивлении всех структур наблюдается раздвоенная особенность на напряжениях,

близких к сверхпроводящей щели алюминия $\Delta=180$ μeV (Рис. 1). Эта особенность ведет себя как единое целое при нагревании до температуры сверхпроводящего перехода. Расщепление связано с присутствием ферромагнетика в области слабой связи.

Было обнаружено, что при инжекции спин-поляризованного тока вплоть до 10 μA (при помощи перпендикулярного ферромагнитного электрода) величина расщепления увеличивается на 15% по сравнению с исходным. Спиновая инжекция подтверждена расчетами для конкретной геометрии и материалов.

Раздвоенная особенность на дифференциальном сопротивлении имеет магнитную природу. Это подтверждается экспериментами во внешнем магнитном поле H , перпендикулярном слою Fe. При H , близком к коэрцитивному полю субмикронной полоски железа (400-500 Э), раздвоенная особенность переходит в одинарную (Рис. 1), по аналогии с [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты N 17-02-00933 и N 19-02-00452.

Литература

- [1] J. J. A. Baselmans, A. F. Morpurgo, B. J. van Wees and T. M. Klapwijk, Nature (London) 397, 43 (1999)
- [2] T. E. Golikova, F. Hübner, D. Beckmann, I. E. Batov, T. Yu. Karminskaya, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, and V. V. Ryzanov, Phys. Rev. B 86, 064416 (2012)

Равновесная и неравновесная спиновая поляризация в окрестности фактора заполнения $3/2$

М. А. Хитко, Л. В. Кулик, А. С. Журавлёв

ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

Интерес к физике дробных состояний с четными знаменателями является одним из современных трендов изучения дробного квантового эффекта Холла. Совершенно неожиданными оказались недавние магнитотранспортные эксперименты по детектированию устойчивого дробного состояния $3/2$ в обычных GaAs/AlGaAs гетероструктурах с модифицированными краевыми состояниями [1]. По всей вероятности, такое состояние всегда формируется в объеме гетероструктуры. Однако оно не наблюдалось ранее в силу каких-то особенностей краевых состояний при четных знаменателях. По этой причине возникает потребность в проведении исследований объемных свойств состояния $3/2$ и его окрестностей с помощью экспериментальных методик альтернативных магнитотранспортным.

В течение последних лет нами развивались оптические методы мониторинга спиновой поляризации электронной системы и создания неравновесных спиновых ансамблей в двумерной электронной системе, исследования их релаксации в основное состояние [2-3]. Из информации о том, как релаксируют спиновые возбуждения, можно сделать заключения о том, как локально устроена спиновая плотность в основном состоянии. В представленной работе обсуждаются эксперименты по исследованию спиновой поляризации электронной системы и по релаксации спиновых возбуждений в окрестности фактора заполнения $3/2$. Обнаружена область факторов заполнения в окрестности $3/2$, где наблюдается гигантское замедление релаксации циклотронных спиновых возбуждений в основное состояние. Одним из наиболее интересных результатов является доказательство того, что фактор заполнения $3/2$ является особой точкой для основного состояния двумерной электронной системы в GaAs/AlGaAs гетероструктурах, в окрестности которой ее спиновые свойства меняются кардинально. Из представленных экспериментальных результатов следует, что дробное состояние $3/2$ является уникальным физическим объектом, не аналогичным ни спин поляризованному состоянию $5/2$, ни частично поляризованному по спину состоянию композитных фермионов $1/2$. Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

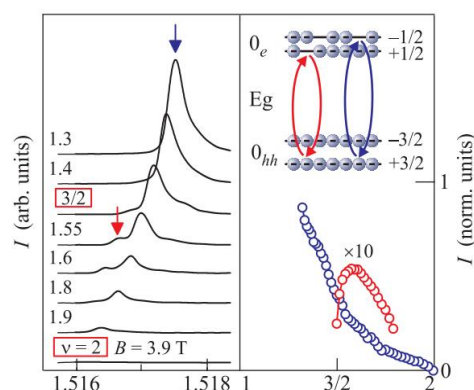


Рис.1 Слева – спектры резонансного рассеяния света. Справа – относительные интегральные интенсивности линий резонансного отражения.

Литература

- [1] H. Fu, P. Shan, P. Wang, Z. Zhu, L. N. Pfeier, K. W. West, and X. Lin, arXiv:1702.02403.
- [2] L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. B. Timofeev, S. Dickmann, and I. V. Kukushkin, Sci. Rep. 5, 10354 (2015).
- [3] L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, V. B. Timofeev, I. V. Kukushkin, and S. Schmult, Sci. Rep. 8, 10948 (2018).

ISBN 978-5-6040418-2-6

