

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела Российской академии наук

Российский научный фонд (РНФ)

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

Сборник тезисов



***31 мая-1 июня 2023 года
г. Черноголовка, Московская обл.***

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

***31 мая-1 июня 2023 года
г. Черногоровка, Московская обл.***

Программный комитет:

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

Организационный комитет:

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

ISBN 978-5-6045956-3-3



9 785604 595633

ISBN 978-5-6045956-3-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ПЛАЗМОНЫ.

<u>В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин.</u> Плазменные фазовращатели для систем терагерцовой электроники.....	6
<u>П.А.Гусихин, К.Р.Джигирба, А.С.Астраханцева, И.В.Кукушкин, В.М.Муравьев.</u> Открытие высокочастотных суперрезонаторных мод Фабри-Перо.....	7
<u>Д.А.Родионов, И.В.Загороднев.</u> Магнитоплазменные колебания в полосе с анизотропным двумерным электронным газом в случае сильного экранирования металлическим затвором.....	8
<u>В.А.Волков.</u> Околозатворные плазмоны в 2D электронной системе с расщеплённым затвором.....	9
<u>А.А.Заболотных.</u> Плазменные солитоны огибающей в двумерной электронной системе	10

СЕКЦИЯ 2. ФИЗИКА ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ.

<u>А.Б.Ваньков.</u> Характер смешивания уровней Ландау и функция распределения электронов в режиме квантового эффекта Холла.....	11
<u>П.С.Бережной, А.Б.Ваньков, А.С.Кореев, И.В.Кукушкин.</u> Квантово-холловские спиновые текстуры за пределами скирмионного приближения	12
<u>С.И.Дорожкин, А.А.Капустин, И.Б.Федоров.</u> Двухслойные и однослойные состояния квантового Эффекта холла в широких квантовых ямах.....	13
<u>А.В.Щепетильников, А.Р.Хисамеева, С.А.Лопатина, Г.А.Николаев, И.В. Кукушкин.</u> Спиновый резонанс в сильно-коррелированных двумерных электронных системах	14
<u>В.В.Соловьев, П.С.Бережной, А.С.Кореев, А.Б.Ваньков.</u> Двумерные и трехмерные спектральные особенности фотолюминесценции гетероструктур ZnO/MgZnO: ультранизкие температуры и сильные магнитные поля.....	15

СЕКЦИЯ 3. ЭКСИТОНЫ, РОТОНЫ, ПОЛЯРИТОНЫ.

<u>А.В.Горбунов, А.В.Ларионов, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев.</u> Конденсаты магнитовозбуждений в квантово-холловских диэлектриках	16
<u>Л.В.Кулик.</u> Нелинейный оптический отклик возбуждений лафлиновской жидкости	17
<u>А.В.Ларионов, Л.В.Кулик.</u> Изучение спиновой жесткости двумерной электронной системы методом время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра при целочисленных и дробных факторах заполнения.....	18
<u>А.А.Деменев, И.М.Фрадкин, В.Д.Кулаковский, В.Н.Антонов, Н.А.Гиппиус.</u> Плазменная решётка для оптического маршрутизатора циркулярно-поляризованных световых пучков на ТЕ и ТМ волноводных модах	19
<u>С.С.Гаврилов.</u> Спиновые переходы в мультстабильном конденсате двумерных экситонных поляритонов.....	20

СЕКЦИЯ 4. НОВЫЕ СИСТЕМЫ.

<u>А.А.Максимов</u> , И.И.Тартаковский. Лазерное излучение с круговой поляризацией из хирального микрорезонатора с электрической накачкой.....	21
<u>А.А.Максимов</u> , И.И.Тартаковский, Н.А.Абдуллаев, В.Н.Зверев. Температурные исследования спектров комбинационного рассеяния света в магнитных топологических изоляторах MnBi_2Te_4 и MnSb_2Te_4	22
<u>А.Ю.Субекин</u> , В.И.Кукушкин, Р.Ш.Алиева, Е.Г.Завьялова. Использование аптасенсоров с целью SERS-детекции ботулотоксина	23
<u>А.В.Черненко</u> , А.С.Бричкин, Г.М.Голышков. Влияние вертикального электрического поля на межслойные экситоны в гетероструктурах $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$	24
<u>С.В.Зайцев</u> . Магнитооптика легированных хромом квантовых ям $\text{ZnSSe}/\text{ZnMgSSe}$	25

СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ.

<u>И.В.Андреев</u> , Н.Д.Семенов, П.А.Гусихин, А.А. Заболотных, В.М.Муравьев, И.В. Кукушкин. Управление плазмон-фотонным взаимодействием в экранированных двумерных системах	26
<u>И.Ш.Бахтеев</u> , С.Ю.Молчанов. Моделирование волноводного двунаправленного ответвителя миллиметрового диапазона.....	27
<u>В.Е.Бисти</u> . Изменение продольного сопротивления в режиме квантового Холла в условиях электронного спинового резонанса	28
<u>В.Д.Бобова</u> . Делитель мощности.....	29
<u>А.С.Бричкин</u> , Г.М.Голышков, А.С.Черненко. Прямые и межслойные экситоны при комнатной температуре в двойных квантовых ямах на основе монослоев MoSe_2 и WSe_2	30
<u>Г.М.Голышков</u> , А.С.Бричкин, А.В.Черненко. Эффект экранирования в гетероструктурах с монослоями дихалькогенидов переходных металлов.....	31
<u>К.Р.Джикирба</u> , А.С.Астраханцева, П.А.Гусихин, В.М.Муравьев. Плазмонная метаповерхность на основе двумерной электронной системы	32
<u>А.И.Дмитриев</u> , А.В.Кочура, А.П.Кузьменко, З.Х.Аунг, В.В.Родионов, С.Ф.Маренкин, Б.А.Аронзон. Магнитная анизотропия игольчатых монокристаллических включений MnSb в матрице InSb	33
<u>М.С.Дмитриева</u> , А.И.Дмитриев. Магнетизм и магнитный фазовый переход в нанопроволоках диамагнитно-разбавленных сверхсильных магнитов $\epsilon\text{-In}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$	34
<u>М.В.Дорохин</u> , П.Б.Дёмина, И.Л.Калентьева, А.В.Здоровейцев, Ю.А.Дудин. Влияние ионного облучения на характеристики спиновых светоизлучающих диодов $\text{CoPt}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$	35
<u>А.А.Жуков</u> , А.С.Бричкин, А.В.Черненко, В.В.Дремов, Л.О.Елесин, Н.А.Барин, Д.В.Клинов. Использование субмикронных стеклянных капилляров в качестве зонда в АСМ-манипуляторе	36
<u>Е.Г.Завьялова</u> , В.И.Кукушкин, А.Н.Нечаев. Трековые мембраны с наноструктурированным слоем серебра, модифицированные ДНК-аптамером, для обнаружения единичных вирусов гриппа А в биологических жидкостях	37

<u>И.В.Загороднев</u> , Д.А.Родионов, А.А.Заболотных, В.А.Волков. Затухание плазменных колебаний в латерально ограниченных двумерных электронных системах	38
<u>А.М.Зарезин</u> , В.М.Муравьев, П.А.Гусихин, И.В.Кукушкин. Обнаружение эффектов гибридизации магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах в форме квадрата.....	39
<u>А.А.Капустин</u> , С.И.Дорожкин. Моделирование влияния магнетоплазменного поглощения на осцилляции сопротивления, индуцированные микроволновым излучением	40
А.Б.Ваньков, <u>А.С.Кореев</u> , П.С.Бережной, И.В.Кукушкин. Ферромагнитный переход сильнокоррелированной двумерной электронной системы при нецелочисленных факторах заполнения	41
<u>С.А.Лопатина</u> , А.В.Щепетильников, А.Р.Хисамеева, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин. Эффект слабой антилокализации в AlAs/AlGaAs квантовой яме	42
<u>С.Ю.Молчанов</u> , И.Ш.Бахтеев. Узкополосный фильтр КВЧ диапазона.....	43
<u>Г.А.Николаев</u> , А.Р.Хисамеева, С.А.Лопатина, А.В.Щепетильников, ¹ И.В. Кукушкин. Происхождение аномального спинового резонанса в сильно коррелированной электронной системе.....	44
В.А.Пастушенко. Анализ криптографической стойкости магистрального протокола квантового распределения ключа, предполагающего использование оптических усилителей.....	45
М.В.Яровиков, <u>А.С.Смирнов</u> , Е.В.Жданова, А.В.Гутор, М.Ю.Вяткин. Аутентификация участков протяжённых волоконно-оптических линий связи с помощью паттернов обратно рассеянного излучения	46
<u>С.Н.Терешко</u> , А.А.Деменев. Влияние экситонного резервуара на параметрическое поляритонное рассеяние в мезоструктурах на основе GaAs микрорезонаторов.....	47
<u>А.А.Титенко</u> . Согласованная поглощающая нагрузка	48
<u>А.Р.Хисамеева</u> , А.В.Щепетильников, Я.В.Федотова, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин. Низкотемпературные свойства кремниевого детектора суб-терагерцового излучения .	49
<u>А.Р.Хисамеева</u> , А.В.Щепетильников, С.А.Лопатина, Г.А.Николаев, Я.В.Федотова, И.В.Кукушкин. Плазменные возбуждения в SiGe/Si квантовых ямах....	50

Плазменные фазовращатели для систем терагерцовой электроники

В.М.Муравьев,* И.В.Кукушкин*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика
Осипьяна, д.2***e-mail: muravev@issp.ac.ru*

Создание фазированной антенной решетки (ФАР) в субтерагерцовом/терагерцовом (0.1 - 1) ТГц частотном диапазоне является одной из наиболее актуальных задач современной высокочастотной электроники. ФАРы сантиметрового диапазона длин волн сегодня широко применяются в радиолокации, наземно-космической связи, передовых системах спутникового интернета, в дистанционном зондировании земли и в радиовидении для систем безопасности. Более высокочастотные субтерагерцовые/терагерцовые ФАРы также начинают находить различные гражданские и военные применения [1].

Существующие подходы к созданию фазовращателей для терагерцового (ТГц) диапазона имеют ряд недостатков. Например, ТГц фазовращатели, построенные на PIN диодах или FET переключающих элементах, страдают от больших потерь и дискретности в изменении фазы. Жидкокристаллические фазовращатели громоздки и медленны, что существенно ограничивает их область применения. В последнее время активно осваиваются фазовращатели на базе графена. Однако, их непросто интегрировать в единую ФАР из-за фундаментальных проблем с изготовлением образцов графена большой площади с достаточной чистотой и однородностью.

В настоящем цикле работ был разработан и экспериментально исследован перестраиваемый плазменный фазовращатель на базе двумерной электронной системы (ДЭС) в высококачественных полупроводниковых GaAs/AlGaAs гетероструктурах [2]. Были изучены физические ограничения на работу фазовращателя в диапазоне температур (4.2 – 300) К. Было установлено, что на частотах больше 300 ГГц плазменный фазовращатель работает вплоть до комнатной температуры [3]. Было проведено экспериментальное исследование плазменного фазового сдвига, вносимого двумерной электронной системой, расположенной на диэлектрической подложке. Изучено влияние частоты излучения, плотности электронов в ДЭС и параметров полупроводниковой подложки на величину фазового сдвига. Установлено, что максимальный фазовый сдвиг, который можно достичь в предложенной схеме составляет 180° . Экспериментально продемонстрирован фазовый сдвиг в 105° при потерях в пропускании не более -3 дБ.

Полученные результаты открывают большие перспективы для практического применения разработанной технологии.

Литература

- [1] L.Wang, Y.Zhang, X.Guo, T.Chen, H.Liang, X.Hao, X.Hou, W.Kou, Y.Zhao, T.Zhou, S.Liang, and Z.Yang, *Nanomaterials* 9(7), 965 (2019).
- [2] V. M. Muravev, A. Shuvaev, A. S. Astrakhantseva, P. A. Gusikhin, I. V. Kukushkin and A. Pimenov, *Appl. Phys. Lett.* 121, 051101 (2022).
- [3] “Demonstration of the plasmonic THz phase shifter at room temperature” K.R. Dzhikirba, A. Shuvaev, D. Khudaiberdiev, I.V. Kukushkin, V.M. Muravev, на рассмотрении в *Appl. Phys. Lett.*

Открытие высокодобротных суперрезонаторных мод Фабри-Перо

**П.А.Гусихин,^{1*} К.Р.Джигирба,^{1,2} А.С.Астраханцева,^{1,2} И.В.Кукушкин,¹
В.М.Муравьев¹**

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

²МФТИ (НИУ), 141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д.9

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

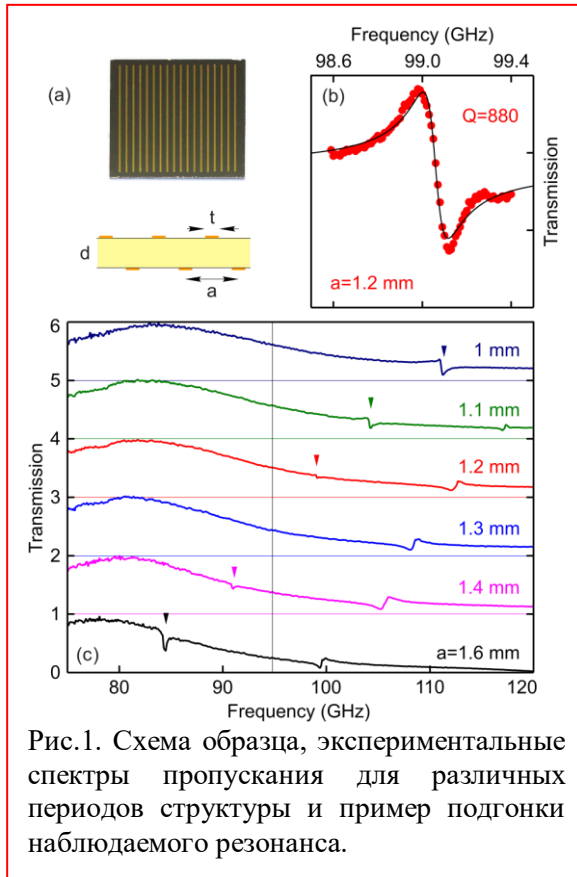


Рис.1. Схема образца, экспериментальные спектры пропускания для различных периодов структуры и пример подгонки наблюдаемого резонанса.

Известно, что при прохождении электромагнитного излучения через слой диэлектрика в пропускании наблюдаются резонансы Фабри-Перо. Их добротность невелика и определяется диэлектрической проницаемостью диэлектрика. Однако, возможно получить высокодобротные резонансы, если вызвать сильное взаимодействие между различными электромагнитными модами в резонаторе. При этом одна из мод переходит в тёмное состояние, которое называется «суперрезонаторной модой» [1].

В данной работе исследовались спектры пропускания диэлектрической пластинки с нанесёнными на неё с двух сторон периодическими металлическими решётками в субтерагерцовом частотном диапазоне. При этом, металлические решётки смещены относительно друг друга на половину периода. В качестве диэлектрика использовалась пластина из высокорезистивного кремния толщиной 0.46 мм и латеральными размерами 2×2 см².

В спектрах пропускания были обнаружены высокодобротные резонансы (добротность достигала величины $Q = 1000$), имеющие ассиметричную форму (рис.1). Были исследованы образцы с различными значениями периода решётки. Изменение периода вызывает изменение резонансной частоты, амплитуды и добротности резонанса. А именно, частота резонанса совпадает с частотой моды, распространяющейся в диэлектрическом волноводе, с волновым вектором, задающимся периодом решётки. При этом, добротность меняется немонотонно и достигает своего максимума, если частота моды диэлектрического волновода совпадает с частотой резонанса Фабри-Перо. Одновременно, в этом случае, амплитуда резонанса уменьшается до нуля, то есть мода становится полностью тёмной.

Литература

[1] M. Rybin and Y. Kivshar, Nature (London) 541, 164 (2017).

Магнитоплазменные колебания в полосе с анизотропным двумерным электронным газом в случае сильного экранирования металлическим затвором

Д.А.Родионов,^{1,2*} И.В.Загороднев¹

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

²*МФТИ, 117303, Москва, ул. Керченская, д.1А, корп.1*

**e-mail: rodionov.da@phystech.edu*

Возбуждение коллективных колебаний электронов, называемых плазмонами, в двумерных электронных системах представляет особый интерес для наноплазмоники и нанофотоники. Основными характеристиками этих колебаний является их частота и затухание, которые зависят от проводимости и геометрии рассматриваемой системы. Наличие анизотропии предоставляет дополнительную возможность управления плазмонами.

В данной работе рассмотрены плазмоны в полосе с двумерным электронным газом, поверхность Ферми которого является эллипсом. Такой газ, к примеру, возникает при определенных условиях в деформированных квантовых ямах AlAs/GaAs [1]. Полоса помещена в область однородного постоянного магнитного поля, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Под полосой находится металлическая пластина, причем исследовался случай, когда расстояние между ними много меньше, чем все характерные длины в системе (приближение локального взаимодействия). Проводимость двумерного электронного газа описывается в модели Друде, где время релаксации электронов мы считаем не зависящим от их направления импульса и энергии. Оси тензора проводимости ориентированы произвольным образом относительно края полосы.

Оказалось, что частота и затухание фундаментальной моды, соответствующей краевому магнитоплазмону, не зависит от магнитного поля. Длина локализации обратно пропорциональна магнитному полю. Частота остальных мод, в отличие от изотропного случая [2], больше не описывается модулем волнового вектора, поперечная компонента которого квантуется из-за наличия краев у полосы. Как и в изотропном случае квадрат частоты магнитоплазмона есть сумма квадрата частоты плазмона без магнитного поля и члена пропорционального квадрату циклотронной частоты. Последнее слагаемое не зависит от ориентации тензора проводимости и всегда меньше квадрата циклотронной частоты. Затухание магнитоплазмона в сильных магнитных полях тоже не зависит от ориентации тензора эффективных масс.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №21-12-00287.

Литература

- [1] M. Shayegan, E.P. De Poortere, O. Gunawan, Y.P. Shkolnikov, E. Tutuc, K. Vakili, Two-dimensional electrons occupying multiple valleys in AlAs, *phys. stat. sol. (b)* 243, 3629 (2006).
- [2] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Two-Dimensional Plasmons in Laterally Confined 2D Electron Systems, *Nanomaterials* 13, 975 (2023).

Околозатворные плазмоны в 2D электронной системе с расщеплённым затвором

В.А.Волков*

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

**e-mail: Volkov.V.A.@gmail.com*

Несколько лет назад было предсказано существование в микроволновом и терагерцовом диапазоне частот качественно новой плазменной моды в двумерной (2D) электронной системе с металлическим затвором в форме полосы конечной ширины («околозатворные» плазмоны) и найдено аналитическое решение для их спектра [1]. Вскоре такие моды действительно были обнаружены в экспериментах на структурах с квантовыми ямами GaAlAs/GaAs и названы «проксимити»-плазмонами (они же «прокси»-плазмоны) [2].

Спектр околозатворных плазмонов был найден в [1] с помощью решения довольно сложного интегрального уравнения, что тормозило применение метода для решения более реалистичных, но актуальных задач. В настоящей работе выведено сравнительно простое дифференциальное уравнение типа уравнения Шредингера для эффективной волновой функции, которая является линейной комбинацией электрического потенциала и электронной плотности плазмона. С помощью этого уравнения удобно аналитически рассматривать свойства частично экранированных плазмонов в структурах с затвором сложной геометрии. Первые результаты реализации такого подхода приведены ниже.

Рассмотрим систему, состоящую из плоскости с 2D электронами и экранирующего их затвора в форме двух одинаковых параллельных металлических полос (расщеплённый затвор). Решения вышеуказанного уравнения разделяются по четности и имеют довольно простой вид в пределе узких затворов. Найден частотный спектр мод в зависимости от компоненты волнового вектора, параллельной полосам затвора. Ожидалось появление двух бесщелевых 1D мод, «акустической» и «оптической».

Действительно, спектр основной четной моды, описывающей синфазные колебания зарядов в двух полосах затвора, имеет бесщелевой вид и качественно не изменяется по сравнению со случаем изолированной полосы. Однако спектр нижней нечетной моды, «оптической», описывающей противофазные колебания зарядов в двух полосах, изменяется качественно, обретая щелевой характер. Величина частотной щели обратно пропорциональна среднему геометрическому между шириной каждой полосы и расстоянием между ними. Обсуждается физический механизм, приводящий к таким результатам.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 21-12-00287.

Литература

- [1] A.A. Zabolotnykh, V.A. Volkov "Interaction of gated and ungated plasmons in two-dimensional electron systems", Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).
- [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, I.V. Kukushkin "Two-dimensional plasmon induced by metal proximity", Phys. Rev. B 99, 241406 (2019).

Плазменные солитоны огибающей в двумерной электронной системе

А.А.Заболотных**ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7***e-mail: andrey.zabolotnyh@phystech.edu*

Аналитически исследуются квазимонохроматические плазменные волны в двумерной (2D) электронной системе (ЭС), помещенной между двух идеальных металлических электродов (затворов). Под квазимонохроматической волной подразумевается модулированная волна, у которой амплитуда высокочастотной несущей медленно меняется в пространстве и времени. Обычным способом описания таких волн в любой системе является вывод уравнения для медленного изменения огибающей. В нелинейном случае, как правило, это уравнение имеет вид нелинейного уравнения Шрёдингера (НУШ) с кубическим нелинейным слагаемым, имеющего много интересных и неожиданных решений, достаточно подробно изученных аналитически и подтвержденных экспериментально, см., например, недавний обзор [1].

В данной работе найдено уравнение для огибающей плазменных волн в 2D ЭС в нелинейном режиме [2]. Получено, что оно действительно имеет вид НУШ с кубической нелинейностью. Оказывается, что, аналогично волнам на поверхности воды [3], нелинейные волны в 2D ЭС имеют разный характерный вид в зависимости от величины параметра qd , где q — волновой вектор несущей, d — расстояние между 2D ЭС и затворами (для волн на поверхности воды соответствующим параметром является qh , где h — глубина водоема). В коротковолновом случае, когда $qd < 1.61$, волна с постоянной амплитудой устойчива, и на её фоне может возникать т.н. темный солитон НУШ. При $qd > 1.61$ возникает неустойчивость волны с постоянной амплитудой относительно длинноволновых флуктуаций, а решения НУШ имеют вид светлых солитонов.

В докладе будут обсуждаться условия применимости использованной аналитической модели динамики нелинейных волн, а также возможность экспериментального обнаружения этих волн.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ 21-72-00114.

Литература

- [1] F. Copie, S. Randoux, P. Suret, Rev. Phys. **5**, 100037 (2020).
- [2] A. A. Zabolotnykh, arXiv:2302.01057 (2023).
- [3] H. Hasimoto, H. Ono, J. Phys. Soc. Jpn. **33**, 805 (1972).

Характер смешивания уровней Ландау и функция распределения электронов в режиме квантового эффекта Холла

А.Б.Ваньков*

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

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

Для описания сильно взаимодействующих двумерных электронных систем в режиме квантового эффекта Холла разработана модифицированная схема точной диагонализации с сокращенной на порядки численностью базиса многочастичных конфигураций, позволяющая адекватный учет смешивания состояний на нескольких уровнях Ландау.

В частности, произведён расчет распределения электронов по уровням Ландау в режиме квантового эффекта Холла при сильном кулоновском взаимодействии. Изучено поведение функции распределения электронов по уровням Ландау в зависимости от фактора заполнения и параметра Вигнера-Зейтса r_s [1].

При том, что функция распределения электронов в двумерных ферми-жидкостях при $r_s > 1$ в нулевом магнитном поле была ранее получена из эксперимента [2] и из расчетов методом Монте-Карло [3], в настоящей работе показано, что квантование Ландау существенно подавляет хвосты распределения и перенормировку скачка Мигдала. Так при $r_s < 1$ и малых факторах заполнения квазичастичный вклад в величину скачка Мигдала $(1-Z)$ зависит околонинойно от ν и квадратично от r_s (см. Рис.1), одновременно при уменьшении ν хвосты функции распределения удлиняются. Механизм перестройки функции распределения в режиме квантового эффекта Холла описан в терминах рождения магнитоплазменных флуктуаций в структуре основного состояния системы. Показано, что главный вклад приносят двух-магнитоплазменные флуктуации с суммарным нулевым импульсом. Аналитически показано, что при малых ν и r_s появление магнитоплазменной «поляризации» в основном состоянии подавлено. Данные результаты созвучны с ранее наблюдавшимися нераспадом ферми-жидкостных квазичастиц и одномодовым характером коллективных возбуждений в режиме квантового эффекта Холла.

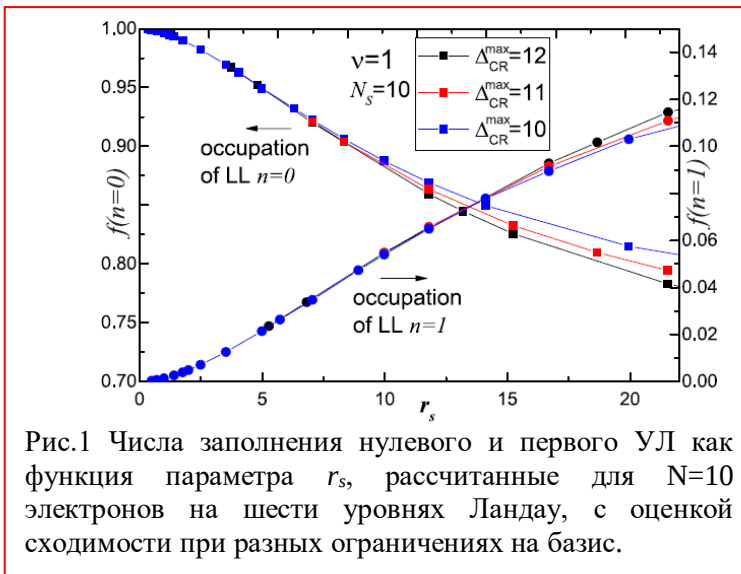


Рис.1 Числа заполнения нулевого и первого УЛ как функция параметра r_s , рассчитанные для $N=10$ электронов на шести уровнях Ландау, с оценкой сходимости при разных ограничениях на базис.

Литература

- [1] Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 5, с. 356 – 362 (2023).
- [2] И.В. Кукушкин, ЖЭТФ 162, вып. 4 (10), с. 480–491 (2022).
- [3] N. D. Drummond and R. J. Needs, Phys. Rev. B 79, 085414 (2009).

Квантово-холловские спиновые текстуры за пределами скирмионного приближения

П.С.Бережной,^{1,2*} А.Б.Ваньков,^{1,2} А.С.Кореев,¹ И.В.Кукушкин^{1,2}

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

²Лаборатория физики конденсированного состояния, НИУ ВШЭ, 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 11

*e-mail: Pavel.s.berezhnoy@gmail.com

Появление двумерных электронных систем (ДЭС) на платформе ZnO/MgZnO гетероструктур привело к прогрессу в решении фундаментальных проблем. В этих системах параметр Вигнера-Зейтса, численно равный отношению кулоновской энергии к циклотронной, равен $r_s \sim 10 - 30$, что определяет доминирующую роль электронных корреляций [1]. В этом ранее недоступном диапазоне параметров ДЭС проявляются особые свойства при очень низких температурах и в квантующих магнитных полях. В частности, кулоновское взаимодействие изменяет структуру уровней Ландау, что приводит к появлению новых фаз целочисленного и дробного квантового эффекта Холла.

В нашей работе были детектированы необычные спиновые текстуры между факторами заполнения $\nu = 1$ и $\nu = 3/2$ [2]. Исследование магнитного порядка производилось при помощи неупругого рассеяния света для изучения спектров коллективных спиновых возбуждений. Кроме того, с помощью техники точной диагонализации было показано, что смешивание и пересечение уровней Ландау играют важную роль в нетривиальной конфигурации спинов.

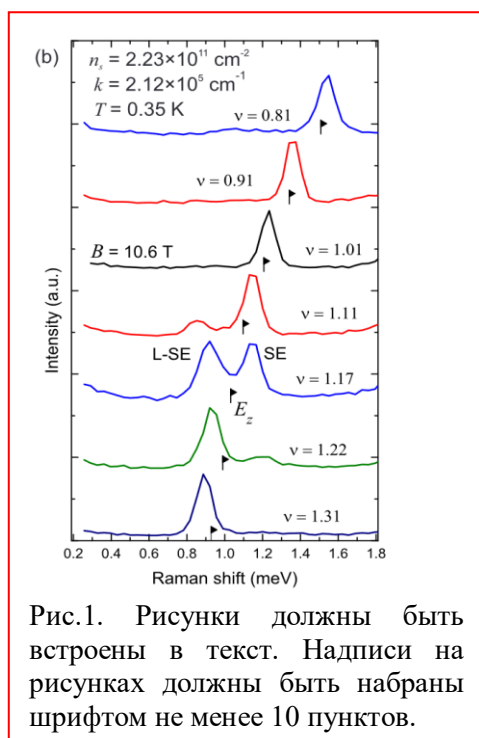


Рис.1. Рисунки должны быть встроены в текст. Надписи на рисунках должны быть набраны шрифтом не менее 10 пунктов.

Были обнаружены две спиновые моды: обычный ферромагнитный спиновый экситон с энергией близкой к зеемановской и дополнительная мягкая спиновая мода, свидетельствующая о нарушении спин-вращательной симметрии в основном состоянии. Важным характеристическим свойством является проявление ярко выраженного антикроссинга двух спиновых режимов, зависящее от двумерного импульса, концентрации электронов, фактора заполнения и наклона магнитного поля.

Измерения проводились на высококачественных высокоподвижных гетероструктурах MgZnO/ZnO с концентрациями электронов в двумерном канале порядка 10^{11} cm^{-2} . Эксперимент проходил в криостате с откачкой паров He^3 со встроенным соленоидом в режиме квантового эффекта Холла. Оптические измерения проводились при помощи перестраиваемого по длине волны лазера.

Литература

- [1] А.Б. Ваньков, И.В. Кукушкин, Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики, Т.113, Вып. 2., 112–125 (2021).
 [2] A.B. Van'kov, A.S. Koreyev, P.S. Berezhnoy, I.V. Kukushkin, Physical Review B. 106, 245308 (2022).

Двухслойные и однослойные состояния квантового Эффекта холла в широких квантовых ямах

С.И.Дорожкин,* А.А.Капустин, И.Б.Федоров

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

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

Исследованы электронные системы, возникающие в полевых транзисторах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs специальной архитектуры, в которых проводящий канал создается в широкой (60 нм) квантовой яме GaAs, помещенной между двумя параллельными ей затворами. В такой системе в зависимости от комбинаций затворных напряжений в нулевом магнитном поле возможно существование либо одной, либо двух двумерных электронных систем (ДЭС), расположенных в последнем случае около противоположных стенок квантовой ямы. В общем случае плотности электронов в этих ДЭС различны. Разработанная авторами оригинальная емкостная методика [1] позволяет характеризовать сжимаемость каждого из двух слоев (или одного слоя в случае однослойной системы), и таким образом регистрировать возникновение несжимаемых состояний в квантующих магнитных полях в каждой из двух ДЭС и определять плотности электронов в них. Эта же методика позволяет отличать двухслойные состояния системы от однослойных.

Оказалось, что двухслойная в нулевом поле, электронная система трансформируется в однослойное состояние в квантующем магнитном поле на факторах заполнения спиновых подуровней Ландау единица и двойка *всеми электронами системы* [2]. В этих состояниях система является несжимаемой и реализует состояния целочисленного квантового эффекта Холла (КЭХ) с соответствующими квантовыми числами. Вне этих факторов заполнения электронная система опять становится двухслойной, свидетельством чего является наблюдение несжимаемых состояний только в одном из слоев. Наблюдаемая картина не зависит от распределения плотности электронов между двумя слоями в нулевом поле.

Измерения, выполненные в наклонном магнитном поле, привели к обнаружению необычных комбинированных состояний дробного КЭХ. Наблюдены дробные состояния при значениях полных факторов заполнения ν_t как с нечетными: $\nu_t=4/3, 10/7, 6/5$, так и с четным: $\nu_t=5/4$ знаменателями [3]. Установлено, что эти состояния являются комбинированными состояниями КЭХ, соответствующими фактору заполнения $\nu \geq 1$ в слое с большей плотностью электронов. При разном соотношении плотностей в слоях, в одной развертке магнитного поля удается наблюдать различные пары состояний дробного КЭХ, что свидетельствует о перераспределении электронов между слоями при изменении поля. Причиной возникновения необычных состояний дробного КЭХ предположительно является особенность исследованных систем, когда ближайшими соседями электронов слоя меньшей плотности являются электроны другого слоя.

Литература

- [1] Dorozhkin S.I., Kapustin A.A., Fedorov I.B., Umansky V., von Klitzing K., Smet J.H., Journ. of Appl. Phys. 2018. Т. 123. С. 084301, 1-5.
- [2] Dorozhkin S.I., Kapustin A.A., Fedorov I.B., Umansky V., Smet J.H., Phys. Rev. B. 2020. Т. 102. С. 235307 1-6.
- [3] Дорожкин С.И., Капустин А.А., Федоров И.Б., Уманский В., Смет Ю.Х., Письма в ЖЭТФ, 2023, Т. 117., № 1, с. 72-79.

Спиновый резонанс в сильно-коррелированных двумерных электронных системах

А.В.Щепетильников,^{1*} А.Р.Хисамеева,¹ С.А.Лопатина,^{2,1} Г.А.Николаев,¹ И.В. Кукушкин¹

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

² НИУ «Высшая Школа Экономики», 10100, Москва, ул. Мясницкая, д. 11

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

Сильное электрон-электронное взаимодействие приводит к существенной модификации спиновых свойств электронной системы. Например, доминирование Кулоновского взаимодействия над характерной энергией кинетического движения электрона вызывает появление макроскопически большой спиновой поляризации электронной системы, а система переходит в ферромагнитное состояние. Внешнее магнитное поле не только усиливает спиновое расщепление, но и “квантует” движение электрона в плоскости системы, при этом ферромагнитный фазовый переход наблюдается уже при значительно более слабом многочастичном взаимодействии. Изменение величины и направления магнитного поля запускает серию фазовых переходов, связанных с изменением суммарной спиновой поляризации системы как при четных, так и при нечетных факторах заполнения системы в режиме квантового эффекта Холла.

В рамках данной работы была изучена эволюция спиновых свойств высококачественных двумерных электронных систем, заключенных в ZnO/MgZnO гетеропереходы, вблизи ферромагнитных фазовых переходов. Анализ интенсивности резонанса позволил установить, что при определенном угле в окрестности фактора заполнения 3 в двумерной электронной системе происходит фазовый переход, сопровождающийся масштабным изменением спиновой поляризации. Непосредственно в области перехода спиновый резонанс значительно уширялся. Такое поведение резонанса, по всей видимости, обуславливается расщеплением системы на домены с различной спиновой поляризацией.

Спиновая релаксация сильно коррелированной электронной системы, заключенной в узкой квантовой яме AlAs, изучается экспериментально в режиме квантового эффекта Холла вблизи нечетных факторов заполнения. Скорость релаксации оценивается путем анализа ширины линии электронного спинового резонанса. Измеренная спиновая динамика, как было показано, претерпевает радикальную модификацию в наклонных магнитных полях. Увеличение угла наклона приводило не только к уменьшению времени релаксации при точном нечетном заполнении практически на порядок, но и к существенно иной зависимости скорости релаксации от фактора заполнения при больших углах наклона. В случае перпендикулярного магнитного поля скорость релаксации достигает своего минимального значения вблизи точного нечетного заполнения и медленно увеличивается при увеличении фактора заполнения ν . При больших же углах наклона релаксация оказывалась наиболее быстрой при некотором ν в непосредственной близости от точно нечетного числа.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-72-10097.

Двумерные и трехмерные спектральные особенности фотолюминесценции гетероструктур ZnO/MgZnO: ультранизкие температуры и сильные магнитные поля

В.В.Соловьев,* П.С.Бережной, А.С.Кореев, А.Б.Ваньков

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

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

Фундаментальные исследования сильнокоррелированных электронных систем сфокусированы прежде всего на установлении природы основного энергетического состояния такого объекта, а также нижайших возбуждений, определяющих его термодинамические свойства.

Оптическая спектроскопия фотолюминесценции полупроводниковых гетероструктур, содержащих квази-двумерные электронные системы, предоставляет косвенный доступ к энергиям возможных возбуждений [1]. Однако эта методика также является и «возмущающей» ввиду кулоновского взаимодействия фотоиндуцированной валентной дырки с темновыми электронами.

В докладе обсуждаются особенности спектров фотолюминесценции и отражения гетероструктур ZnO/MgZnO в экстремальных условиях ультранизких температур и сильных магнитных полей. Приводится классификация трехмерных и «частично-двумерных» спектральных компонент. Особое внимание уделяется вопросу физической природы полосы фотолюминесценции, связанной с двумерными электронами: её положению и целому букету магнитополевых зависимостей, которые на протяжении уже десятилетия не находят полного объяснения [2].

Работа произведена при частичном финансировании в рамках госзадания ИФТТ РАН, экспериментальные исследования поддержаны РНФ 22-12-00257.

Литература

- [1] V. V. Solovyev and I. V. Kukushkin, «Renormalized Landau quasiparticle dispersion revealed by photoluminescence spectra from a two-dimensional Fermi liquid at the MgZnO/ZnO heterointerface», Phys. Rev. B 96, 115131 (2017).
- [2] T. Makino, Y. Segawa, A. Tsukazaki et al., «Magneto-photoluminescence of charged excitons from $\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}/\text{ZnO}$ heterojunctions», PHYSICAL REVIEW B 87, 085312 (2013).

Конденсаты магнитовозбуждений в квантово-холловских диэлектриках

А.В.Горбунов,* А.В.Ларионов, Л.В.Кулик, В.Б.ТимофеевИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика
Осипьяна, д.2

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

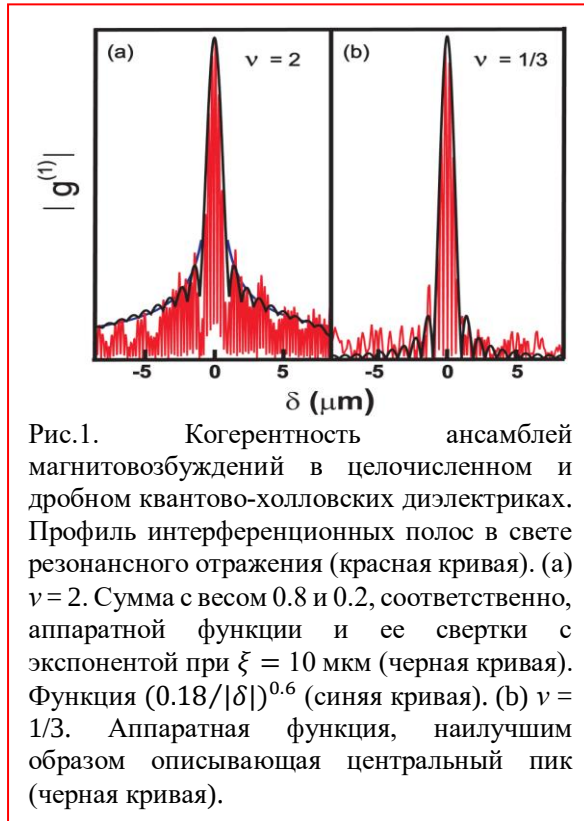


Рис.1. Когерентность ансамблей магнитовозбуждений в целочисленном и дробном квантово-холловских диэлектриках. Профиль интерференционных полос в свете резонансного отражения (красная кривая). (a) $\nu = 2$. Сумма с весом 0.8 и 0.2, соответственно, аппаратной функции и ее свертки с экспонентой при $\xi = 10$ мкм (черная кривая). Функция $(0.18/|\delta|)^{0.6}$ (синяя кривая). (b) $\nu = 1/3$. Аппаратная функция, наилучшим образом описывающая центральный пик (черная кривая).

Экспериментально обнаружено, что в двух различных квантово-холловских диэлектриках транспортные и когерентные свойства конденсатов магнитовозбуждений коррелируют между собой. В частности, конденсат триплетных спиновых циклотронных магнитоэкситонов в целочисленном холловском изоляторе (фактор заполнения $\nu = 2$) [1] демонстрирует длину пространственной когерентности $\xi > 10$ мкм [2], а также способность распространяться в реальном пространстве на макроскопические расстояния, вплоть до миллиметровых [1]. В отличие от этого, плотный ансамбль (конденсат) спин-магнитогравионов в лафлиновской жидкости ($\nu = 1/3$) [3] не демонстрирует ни высокой пространственной когерентности, ни заметного распространения в реальном пространстве. Причем целый ряд свойств этого нового типа конденсированного состояния эквивалентен свойствам конденсированного состояния при $\nu = 2$, а

именно: спиновое квантовое число, обобщенный импульс и сверхдлинные времена релаксации возбуждений.

Безусловно, было бы интересно проследить связь между когерентностью и транспортными свойствами ансамблей возбуждений в квантово-холловских системах при ν , отличных от 2 и $1/3$. Однако на данный момент ни при каких других факторах заполнения пока не удастся создавать плотные ансамбли долгоживущих неравновесных возбуждений. Недавно появилось сообщение о первых оптических исследованиях возбужденного дробного состояния при $\nu = 2/5$ [4]. Есть шанс, что в ближайшем будущем фактор заполнения $2/5$ станет доступным для экспериментальных исследований, аналогичных проведенным в настоящей работе.

Литература

- [1] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, S. Dickmann, A.V. Gorbunov, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, S. Schmult, Nature Comm. 7, 13499 (2016).
- [2] А.В. Горбунов, А.В. Ларионов, Л.В. Кулик, В.Б. Тимофеев, Письма в ЖЭТФ 114, 479 (2021).
- [3] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, L.I. Musina, E.I. Belozarov, A.B. Van'kov, O.V. Volkov, A.A. Zagitova, I.V. Kukushkin, V.Y. Umansky, Nature Comm. 12, 6477 (2021).
- [4] P. Knüppel, S. Ravets, M. Kroner, S. Fält, W. Wegscheider, and A. Imamoglu, Nature 572, 91 (2019).

Нелинейный оптический отклик возбуждений лафлиновской жидкости

Л.В.Кулик*

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

В трехмерных электронных системах статистика квазичастиц может быть либо фермионной, либо бозонной. В двумерной электронной системе, помещенной в магнитное поле, ситуация со статистикой квазичастиц кардинально изменяется. Становятся возможны самые различные энионные статистики в промежутке от бозонной до фермионной. Первые экспериментальные доказательства того, что квазичастицы в двумерных электронных системах являются энионами, были продемонстрированы недавно. Показано, что в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов $1/3$ заряженные квазичастицы ведут себя так, как если бы их статистические свойства были не бозевскими и не фермиевскими, а определялись энионной статистикой [1,2]. Таким образом, были получены первые прямые экспериментальные доказательства существования энионной материи. Учитывая то, что лафлиновская жидкость является диэлектриком, ее непосредственное использование для прикладных задач возможно посредством создания плотных ансамблей нейтральных возбуждений. Для этого необходимо ответить на вопрос, чем являются нейтральные возбуждения, рассматривая их как многочастичные нейтральные комплексы энионных квазичастиц. Теоретический консенсус на этот счет существует для магниторотонов - нейтральных возбуждений с единичным орбитальным моментом и нулевым спином. Предполагается, что магниторотоны являются бозонами, хотя проверить это утверждение в настоящее время не представляется возможным, так как магниторотоны хорошо определены при больших обобщенных импульсах порядка обратной магнитной длины. При нулевом импульсе, случае наиболее интересном для экспериментальных исследований, магниторотоны затухают. Теоретически, однако, удастся выделить новую низкоэнергетическую ветвь нейтральных возбуждений, выживающую при нулевом импульсе: ветвь магнитогравитонов с орбитальным моментом 2. Принято описывать магнитогравитоны на языке возмущений некоторой пространственной метрики, введенной для системы черн-саймоновских квазичастиц [3]. Естественно, что с помощью дипольно-разрешенных оптических переходов создать подобные возбуждения невозможно. Тем не менее, экспериментально удалось создать условия для формирования плотных ансамблей не самих магнитогравитонов, а их компаньонов с единичным спином: спин-магнитогравитонов [4]. Оказалось, что спин-магнитогравитоны имеют беспрецедентно длинные времена жизни (более 10 секунд), что позволяет экспериментально создавать новые материальные системы: лафлиновские растворы спин-магнитогравитонов контролируемой плотности. В представленной работе показано, что лафлиновская жидкость, возбужденная спин-магнитогравитонами, демонстрирует нелинейный оптический отклик, который объясняется новым типом рассеяния света: антистоксовым-стоксовым когерентным рассеянием света от ансамбля спин-магнитогравитонов.

Литература

- [1] H. Bartolomei et al., Science 368, 173 (2020).
- [2] J. Nakamura, S. Liang, G.C. Gardner, M.J. Manfra, Nature Phys. 16, 931 (2020).
- [3] F. D. M. Haldane. Phys. Rev. Lett. 107, 116801 (2011).
- [4] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina et al., Nature Commun. 12, 6477 (2021).

Изучение спиновой жесткости двумерной электронной системы методом время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра при целочисленных и дробных факторах заполнения

А.В.Ларионов,* Л.В.Кулик

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

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

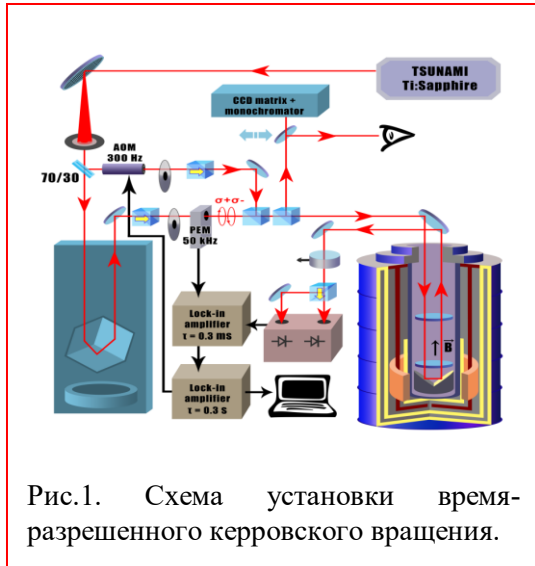


Рис.1. Схема установки время-разрешенного керровского вращения.

Методом время-разрешенного магнито-оптического эффекта Керра исследовалась динамика спинов двумерных электронов в 17 нм GaAs квантовой яме (КЯ) при целочисленном ($\nu=1$) и дробном ($\nu=3/2$) факторах заполнения. Для оптического фото-возбуждения использовался фемтосекундный титан-сапфировый лазер, перестраиваемый по длине волны, совместно с формирователем длительности импульсов. Исследуемый образец с GaAs КЯ помещался в специальную вставку для конденсации изотопа гелия ^3He , которая находилась внутри гелиевого криостата с соленоидом с изменяемым магнитным полем в диапазоне от 0 до 10 Тл. Конструкция вставки позволяла плавно менять температуру в

диапазоне от 0.6 К до 15 К. Держатель образца внутри вставки содержал оптическое окно, через которое заводилось лазерное фотовозбуждение к изучаемому образцу и собирался полезный сигнал. Исследуемый образец монтировался в держателе таким образом, что наклон плоскости квантовой ямы к направлению вектора магнитной индукции составлял 45 градусов.

В эксперименте измерялось время спиновой дефазировки двумерных электронов в окрестности фактора заполнения $\nu=1$ и $\nu=3/2$ при температурах от 0.6 до 15К. Было обнаружено, что спиновая жесткость как на факторе заполнения $\nu=1$, так и на $\nu=3/2$ не меняется до температур порядка 5К, при которых двумерная электронная система практически полностью деполяризована. В случае с $\nu=1$ это означает, что холловский ферромагнетик в процессе нагрева перед тем, как превратится в парамагнетик, переходит через дополнительное промежуточное фазовое состояние, характеризующееся высокой спиновой жесткостью и большой корреляционной длиной спин-спиновых корреляций, сравнимых с аналогичными в холловском ферромагнитном состоянии, но малой средней по образцу спиновой поляризацией. Тот экспериментально обнаруженный факт, что спиновая жесткость в дробном спин-неполяризованном состоянии $\nu=3/2$ приближается по величине к спиновой жесткости холловского ферромагнетика, является независимым подтверждением локальной несжимаемости состояния $\nu=3/2$, обнаруженное ранее в работе [2].

Таким образом, продемонстрировано, что метод керровского вращения позволяет изучать спиновую жесткость, как в сильно- так и в слабо-поляризованной по спину двумерной электронной системе на дробных и целочисленных факторах заполнения.

Литература

- [1] Larionov A.V., Stepanets-Khussein E., Kulik L.V. et al., Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. P.
- [2] Kulik L.V., Kuznetsov V.A., Zhuravlev A.S. et al., Phys. Rev. Res. 2020. V. 2. No. 3. Art. No. 033123.

Плазмонная решётка для оптического маршрутизатора циркулярно-поляризованных световых пучков на ТЕ и ТМ волноводных модах

А.А.Деменев,^{1*} И.М.Фрадкин,^{2,3} В.Д.Кулаковский,^{1,4} В.Н.Антонов,^{2,5} Н.А.Гиппиус²

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

²Сколковский институт науки и технологий, 121205, Москва, Большой бульвар, 30/1

³МФТИ (НИУ), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 2

⁴НИУ ВШЭ РАН, 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

⁵Physics Department, Royal Holloway, University of London, Egham, Surrey TW20 0EX, UK

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

В связи с активным развитием нанофотоники, значительные усилия направляются на исследования взаимодействия плазмонных метаповерхностей с оптическим полем. В недавней работе [1], на примере GaAs волноводных метаструктур было показано, что ТЕ-волноводные моды выводятся определенными плазмонными решетками (ПР) в практически циркулярный свет.

В настоящей работе исследована возможность организации с помощью золотых ПР взаимодействия между циркулярно-поляризованным (ЦП) внешним полем и волноводными модами в метаструктурах на основе Si (рис.1a) при комнатной температуре. Показано, что при резонансной оптической накачке в активном слое возбуждаются и ТЕ- и ТМ-волноводные моды (рис.1b). Моды выводятся ПР в циркулярно-поляризованный свет, величина степени ЦП излучения в направлении нормали к структуре достигает 95%, а поворот поляризации в волноводной моде приводит к смене циркулярной компоненты внешнего поля (рис.1c). Таким образом, результаты работы позволяют рассматривать исследованную метаструктуру как оптический маршрутизатор ТЕ- и ТМ-волноводных мод, управляемый поляризацией света.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

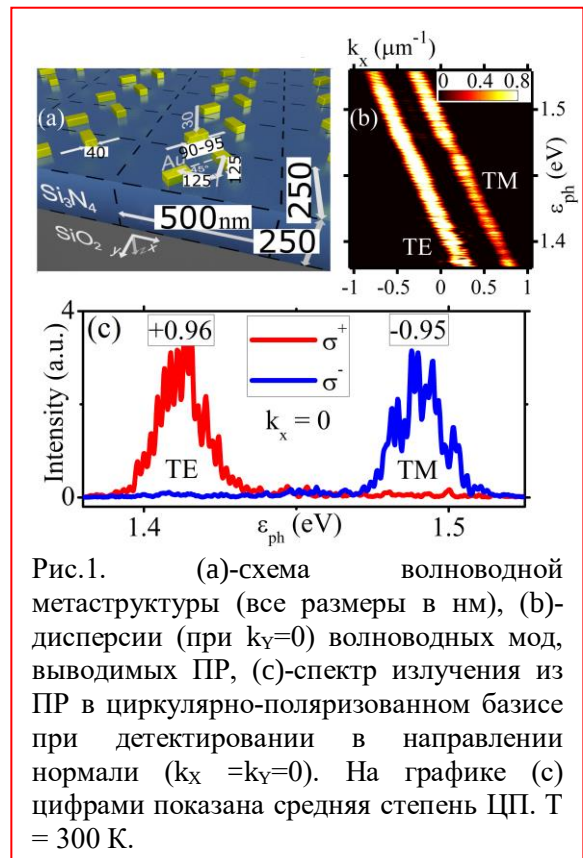


Рис.1. (a)-схема волноводной метаструктуры (все размеры в нм), (b)-дисперсии (при $k_y=0$) волноводных мод, выводимых ПР, (c)-спектр излучения из ПР в циркулярно-поляризованном базисе при детектировании в направлении нормали ($k_x=k_y=0$). На графике (c) цифрами показана средняя степень ЦП. $T = 300$ К.

Литература

[1] I.M. Fradkin, A.A. Demenev, V.D. Kulakovskii, V.N. Antonov and N.A. Gippius, Appl. Phys. Lett. 120, 171702 (2022).

Спиновые переходы в мультистабильном конденсате двумерных экситонных поляритонов

С.С.Гаврилов*

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

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

Двумерные поляритоны, локализованные в активной области плоского микрорезонатора, при возбуждении резонансным светом образуют макроскопически когерентные состояния, которые могут рассматриваться в приближении среднего поля по аналогии с неравновесными бозе-конденсатами. Благодаря нелинейности такая система оказывается мультистабильной и в ней возможны чрезвычайно быстрые управляемые переключения между альтернативными когерентными состояниями, различающимися по амплитуде, фазе или знаку циркулярной поляризации [1]. В докладе обсуждаются недавние экспериментальные [2] и теоретические [3] результаты, полученные в этой области.

В частности, было продемонстрировано, что короткое обратимое возмущение собственной энергии экситона, вызванное деформационным импульсом пикосекундной длительности, может сопровождаться резким необратимым переходом от почти линейной к почти циркулярной поляризации света, излучаемого поляритонами под действием непрерывной лазерной волны [2]. Этот эффект был предсказан ранее [1]; его наблюдение подтверждает основные микроскопические предпосылки теории, в частности, сильное упругое отталкивание поляритонов с параллельными спинами (соответствующий фиолетовый сдвиг резонанса на порядок превосходит ширину линии) и пренебрежимо малое парное взаимодействие поляритонов с антипараллельными спинами (это дает возможность манипулировать спиновыми компонентами по отдельности).

Определенный интерес также вызывает система, в которой спиновые компоненты конденсата, возбуждаемые строго одинаково, связаны между собой линейным образом. Такая связь может быть вызвана искусственно и поддается контролю — например, в условиях латеральной анизотропии квантовой ямы или в магнитном поле, направленном параллельно резонатору. Согласно [3], в подобной системе существует непрерывный переход от мультистабильных к автоколебательным состояниям, фазовые траектории которых находятся в близкой окрестности потерявших устойчивость неподвижных точек с преимущественно правой или левой циркулярной поляризацией. Изменение плотности возбуждения приводит к росту амплитуды колебаний, после чего два одинаково допустимых решения объединяются и возникает новое — полностью симметричное по спине, но нестационарное — состояние системы. Его частотный спектр представляет собой множество эквидистантных уровней с чередующимися ортогональными линейными поляризациями. Подобное состояние представляет собой сильнонеравновесный аналог джозефсоновских осцилляций, реализующийся в случае диссипативной бозе-системы в резонансном электромагнитном поле.

Литература

- [1] С.С. Гаврилов, УФН 190, 137 (2020).
- [2] A.A. Demenev, D.D. Yaremkevich, A.V. Scherbakov, S.S. Gavrilov, D.R. Yakovlev, V.D. Kulakovskii, and M. Bayer, Phys. Rev. Applied 18, 044045 (2022).
- [3] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B 106, 045304 (2022).

Лазерное излучение с круговой поляризацией из хирального микрорезонатора с электрической накачкой

А.А.Максимов, И.И.Тартаковский

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

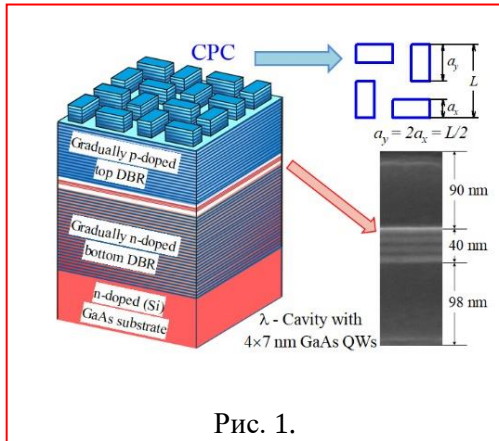


Рис. 1.

Разработка хиральных оптических микрорезонаторов является центральной концепцией современной нанофотоники, позволяющей получить полный контроль над поляризацией ограниченных электромагнитных мод. В работе [1] **впервые** продемонстрирована реализация компактного источника когерентного излучения на основе хирального полупроводникового микрорезонатора с электрической накачкой (поверхностно-излучающий микролазер с вертикальным резонатором (VCSEL)– Vertical-cavity surface-emitting laser). Устройство состоит из AlAs/(Al,Ga)As микрорезонатора, содержащего несколько GaAs квантовых ям в

активной области, и пластины хирального фотонного кристалла, вытравленной в верхнем распределенном брэгговском отражателе (рис. 1).

Структура обеспечивает лазерную генерацию с узким спектральным и угловым распределением излучения при инжекции электрического тока в ближней инфракрасной области спектра ($\omega \sim 1.565$ эВ) и степени круговой поляризации, превышающей в некоторых модах величину 90 % (рис. 2). Знак круговой поляризации лазерной генерации контролируется направлением “закрученности” хиральной фотонно-кристаллической пластины и меняется на противоположный в зеркально-симметричной структуре. Обычный способ получения циркулярно поляризованного излучения с использованием четвертьволновых пластин из двулучепреломляющих материалов не отвечают требованиям компактности и совместимости с полупроводниковыми технологиями изготовления элементов и схем нанофотоники. Наши результаты представляют собой важный шаг к практической реализации компактных источников света с круговой поляризацией без приложения внешнего магнитного поля или использования спин-поляризованной накачки.

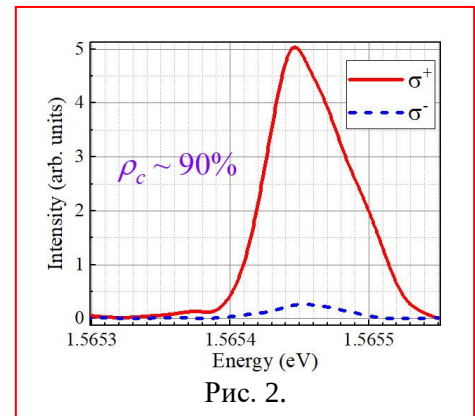


Рис. 2.

Были подробно изучены температурные зависимости свойств лазерного излучения [2], разработаны и оптимизированы электрические методы возбуждения и оптические схемы регистрации с высоким пространственным, временным, спектральным и угловым разрешением спектров излучения наноструктур.

Литература

- [1] A.A. Maksimov, E.V. Filatov, I.I. Tartakovskii et al., Phys. Rev. Appl. 17, L021001 (2022).
- [2] А.А. Максимов, Е.В. Филатов, И.И. Тартаковский, Письма в ЖЭТФ 116, 500–505 (2022).

Температурные исследования спектров комбинационного рассеяния света в магнитных топологических изоляторах MnBi_2Te_4 и MnSb_2Te_4

А.А.Максимов¹, И.И.Тартаковский¹, Н.А.Абдуллаев^{2,3}, В.Н.Зверев¹

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

² Институт физики Мин. науки и обр. Азербайджана, Баку, Азербайджан

³ Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

Реализация магнитного порядка в функциональных квантовых материалах создает богатую платформу для исследования фундаментальных спиновых явлений,

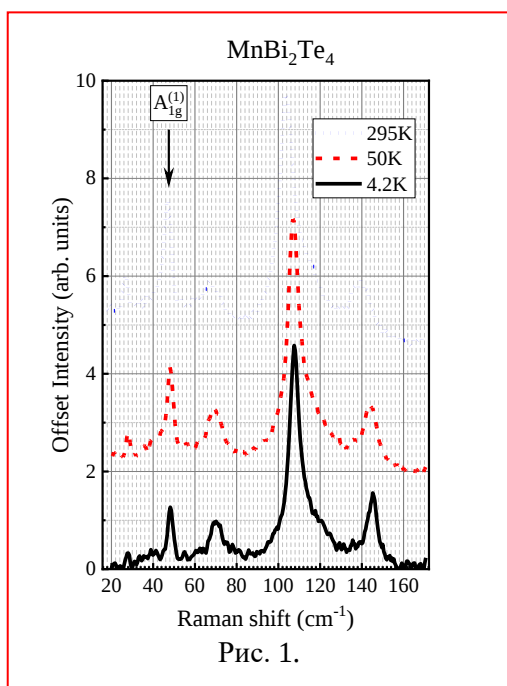


Рис. 1.

примерами которых являются сильно коррелированные материалы, мультиферроики и недавно открытые магнитные топологические материалы. Слоистые кристаллы MnBi_2Te_4 и MnSb_2Te_4 демонстрируют при низких температурах $\sim 25\text{--}30\text{ K}$ переходы в магнитоупорядоченное состояние (антиферромагнитное в MnBi_2Te_4 и ферромагнитное в MnSb_2Te_4) и являются первыми экспериментальными реализациями внутреннего магнитного порядка в трехмерных топологических изоляторах. Поскольку в этих материалах межслойный магнитный порядок тесно связан с топологией зон, это может открыть новые, эффективные пути связи между межслоевым обменом и другими микроскопическими степенями свободы.

Были подробно изучены спектры комбинационного рассеяния (КР) света в кристаллах магнитных топологических изоляторов в широком диапазоне температур, захватывающем область магнитного упорядочения (см. пример спектров на

рис. 1). В работе [1] было сделано утверждение, что частота $A_{1g}^{(1)}$ фонона ($\sim 48\text{ cm}^{-1}$) в кристаллах MnBi_2Te_4 при температурах ниже температуры перехода в антиферромагнитное состояние увеличивается на $\sim 0.3\text{ cm}^{-1}$, что связывалось с проявлением спин-фононного взаимодействия. Ровно противоположное экспериментальное утверждение было сделано в работе [2], где наблюдалось примерно такое же по величине смягчение частоты этого фонона при низких температурах.

Нами были выполнены измерения спектров КР с высокой точностью определения спектрального положения полос КР света. Показано, что с точностью до $\pm 0.1\text{ cm}^{-1}$ температурная зависимость частоты $A_{1g}^{(1)}$ фонона в MnBi_2Te_4 не отличается от стандартной ангармонической модели, не учитывающей спин-фононного взаимодействия.

Исследования поляризационных зависимостей спектров КР света в кристаллах MnSb_2Te_4 свидетельствуют в пользу утверждения работы [3] о том, что в них, в отличие от изоструктурных кристаллов MnBi_2Te_4 , происходит значительное катионное перемешивание Sb и Mn.

Литература

- [1] H. Padmanabhan, M. Poore, P.K. Kim et al., Nature Communications, 13, 1929 (2022).
- [2] J. Choe, D. Lujan, M. Rodriguez-Vega et al., Nano Lett., 21, 6139–6145 (2021).
- [3] H. Li, Y. Li, Y. Lian et al., Sci. China Mater., 65(2), 477–485 (2022).

Использование аптасенсоров с целью SERS-детекции ботулотоксина

А.Ю.Субекин,¹ В.И.Кукушкин,² Р.Ш.Алиева,³ Е.Г.Завьялова³¹*МФТИ (ГУ), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9*²*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2*³*МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 3*

В современном мире существует угроза совершения биотеррористических актов с использованием различных токсинов и патогенов. Многие из них при этом могут быть легко получены даже в «домашних» условиях, например, ботулинический токсин [1]. Вместе с тем он и ряд других токсичных веществ используют в повседневной терапевтической практике в составе различных препаратов, что облегчает возможность применения потенциальными террористами этого оружия массового поражения. В связи с этим своевременное выявление опасных концентраций токсичных веществ в настоящее время является актуальной задачей.

Одним из самых перспективных методов, удовлетворяющих современным требованиям к индикации различных токсинов, является поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия (SERS). Она уже нашла применение в области обнаружения опасных химических и биологических агентов [2]. Однако потенциал этого метода к настоящему времени остается не полностью раскрытым. Поэтому до сих пор различные исследователи предлагают новые системы детекции токсинов на основе SERS, в частности ботулинического [3].

В нашей работе предложена новая система индикации ботулинического токсина типа А (BoNT A). Она представляет собой SERS-субстрат на основе кремниевой подложки и наночастиц серебра с иммобилизованным на них аптамером tok-SH-TAMRA (Syntol). Принцип метода основан на том, что при специфическом взаимодействии BoNT A и tok-SH-TAMRA происходит ослабление SERS-сигнала от метки (TAMRA), входящей в состав аптамера. Таким образом, в

случае положительного результата, интенсивность сигнала в опытном образце будет ниже, чем в контрольном (Рис.1).

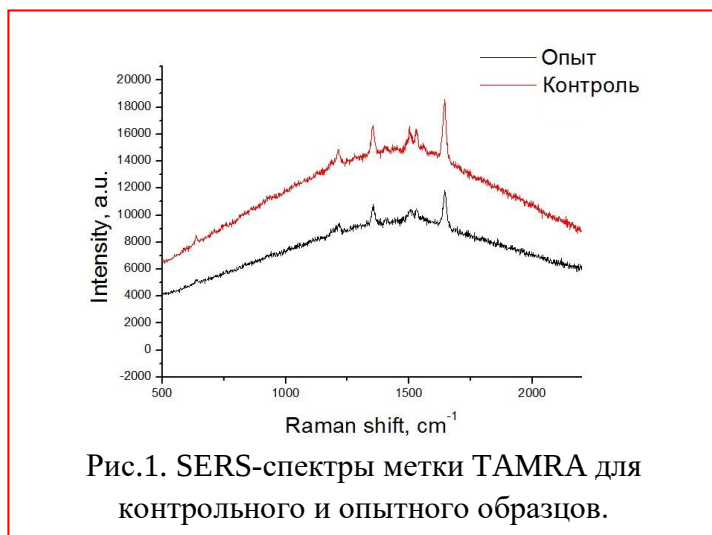


Рис.1. SERS-спектры метки TAMRA для контрольного и опытного образцов.

Литература

1. Fagien S, Carruthers JD., *Plast Reconstr Surg*, 2008, Dec; 122 (6): 1915-25.
2. Kamińska A. et al., *Scientific Reports*, 2017, V. 7, P. 10656.
3. Granger J.H. et al., *Chem. Soc. Rev.*, 2016, V. 45, P. 3865 – 3882.

Влияние вертикального электрического поля на межслойные экситоны в гетероструктурах $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$

А.В.Черненко,* А.С.Бричкин, Г.М.Голышков

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

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

Гетероструктуры с монослоями $\text{WSe}_2/\text{MoSe}_2$, представляют собой квантовые ямы II-типа, в которых монослой MoSe_2 является потенциальной ямой для электронов, а монослой WSe_2 для дырок. Межслойные (пространственно не прямые) экситоны в Ван-дер-Ваальсовых материалах привлекают интерес из-за большой энергии связи ~ 100 мэВ и длинного времени жизни, лежащего в диапазоне от сотен пикосекунд до сотен наносекунд, что позволяет газу экситонов термализоваться. Это открывает путь к исследованию двумерного экситонного газа высокой плотности в условиях квантового вырождения. Вертикальное электрическое поле является эффективным инструментом управления плотностью носителей заряда в монослоях, энергией связи экситонов, их дипольными моментами. Для того, чтобы исследовать влияние вертикального электрического поля на межслойные экситоны, методом эксфолиации и последовательно переноса на подложку Si/SiO_2 были сделаны структуры Graphene-hBN- WSe_2 - MoSe_2 -hBN-Graphite. Контакты Gr(50 нм)/Au (250 нм) для приложения вертикального поля были получены термическим напылением.

На рис.1 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) прямых и непрямых экситонов и трионов в одной из исследованных гетероструктур при приложении вертикального поля. Линии прямых экситонов (DX) и трионов (DT) демонстрируют заметный, до 25 мэВ в поле $F=300$ кВ/см, квадратичный по полю штарковский сдвиг. При приложении поля наблюдается изменение относительных интенсивностей линий экситонов и трионов, вызванное изменением плотности электронов в монослоях.

Межслойные экситоны, обозначенные IX на рис.1 также демонстрируют заметный сдвиг линии ФЛ от поля, этот сдвиг в умеренных электрических полях линейен от напряженности поля F , что связано с ненулевым дипольным моментом непрямых экситонов. В некоторых образцах кроме непрямых экситонов IX, наблюдаются не прямые трионы IT. В этом случае приложение вертикального электрического поля приводит к заметному изменению интенсивности линии непрямого триона.

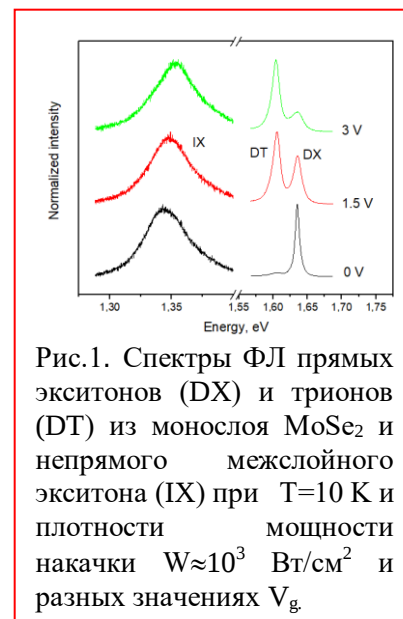


Рис.1. Спектры ФЛ прямых экситонов (DX) и трионов (DT) из монослоя MoSe_2 и непрямого межслойного экситона (IX) при $T=10$ К и плотности мощности накачки $W \approx 10^3$ Вт/см² и разных значениях V_g .

Литература

[1] Y. Jiang et al. Light Sci Appl 10, 72 (2021).

Магнитооптика легированных хромом квантовых ям ZnSSe/ZnMgSSe

С.В.Зайцев*

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

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

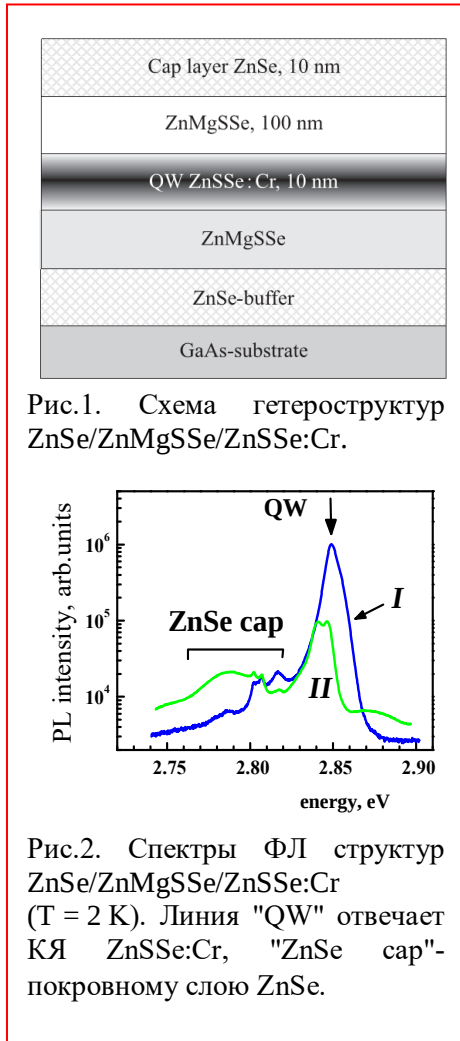


Рис.1. Схема гетероструктур ZnSe/ZnMgSSe/ZnSSe:Cr.

Рис.2. Спектры ФЛ структур ZnSe/ZnMgSSe/ZnSSe:Cr ($T = 2$ К). Линия "QW" отвечает КЯ ZnSSe:Cr, "ZnSe cap"-покрывному слою ZnSe.

В работе исследована магнитооптика легированных хромом квантовых ям (КЯ) ZnMgSSe/ZnSSe:Cr, выращенных на подложке GaAs методом молекулярно-пучковой эпитаксии [1] (рис. 1). В спектрах фотолуминесценции (ФЛ) при низкой температуре $T = 2$ К (рис. 2) линии ниже 2.82 эВ ("ZnSe cap") отвечают экситонам в слое ZnSe, связанным на примесях. Линия "QW" при 2.84–2.85 эВ отвечает ФЛ экситонов из слоя КЯ ZnSSe:Cr, в которой ширина запрещенной зоны E_g сдвинута в сторону более высоких энергий (в чистом ZnSe $E_g \sim 2.82$ эВ).

В образце № II с примесью атомов Cr в КЯ (концентрация хрома $x_{Cr} \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (~ 0.01 at.%)) происходит сильное, на порядок величины, гашение ФЛ из КЯ по сравнению с образцом № I без Cr (рис. 2). Причины подобного подавления межзонной ФЛ детально исследовались в работе [1], где было показано, что в КЯ с $x_{Cr} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$ основным механизмом безызлучательной рекомбинации является захват экситонов атомами Cr с внутрицентровым возбуждением последних.

При низких $T \sim 2$ К циркулярная поляризация $P_C(B)$ линии КЯ отрицательна при $0 < B < 4$ в обоих образцах и в образце без Cr (№ I) слабо монотонно падает с полем, достигая $\sim -2\%$ при $B = 4$ Тл. В образце № II происходит сильный и немонотонный рост $|P_C(B)|$ для ФЛ из КЯ с максимумом $\sim 6\%$ при $B = 2$ Тл. Важно отметить, что знак и немонотонное поведение $P_C(B)$ оптического перехода в КЯ ZnSSe с

примесью Cr противоположны поведению в "классических" разбавленных магнитных полупроводниках группы II-VI с примесью переходных металлов Mn, Co или Fe [2]. Наблюдаемое поведение объясняется сменой знака обменного $p-d$ взаимодействия дырок в КЯ со спинами магнитной примеси (атомы Cr), а его антиферромагнитного характера на ферромагнитный, что также наблюдалось в объемных образцах $\text{Zn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Se}$ ($x < 0.005$) [2].

Литература

- [1] О.В. Коплак, А.И. Дмитриев, А.Д. Таланцев, С.В. Зайцев и др., ФТТ 55, 1758 (2013).
- [2] W. Mac, Nguyen The Khoi, A. Twardowski, and J. A. Gaj, Phys. Lett. 71, 2327 (1993).

Управление плазмон-фотонным взаимодействием в экранированных двумерных системах

**И.В.Андреев,^{1*} Н.Д.Семенов,¹ П.А.Гусихин,¹ А.А. Заболотных,²
В.М.Муравьев,¹ И.В. Кукушкин¹**

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

²*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7*

^{*}*e-mail: andreev@issp.ac.ru*

Двумерная плазмоника является естественным связующим звеном между терагерцовой фотоникой и электроникой: плазмон можно возбудить светом и преобразовать в сигнал постоянного напряжения. Поэтому для практических применений важно уметь управлять силой плазмон-фотонного взаимодействия. Также в практических задачах, как правило, используются двумерные электронные системы (ДЭС), оснащенные затвором для регулировки электрических параметров системы.

Плазмон-фотонное взаимодействие становится сильным, когда скорость плазмонов в ДЭС стремится к скорости света, поэтому часто проявления такого взаимодействия описываются на языке релятивистских эффектов запаздывания. Количественно сила взаимодействия характеризуется безразмерным параметром запаздывания, равным отношению скорости плазмона к скорости света в подложке. До недавнего времени считалось, что в экранированных затвором ДЭС скорость плазменных волн всегда много меньше скорости света, и сила плазмон-фотонного взаимодействия пренебрежимо мала.

В данной работе экспериментально исследованы эффекты плазмон-фотонного взаимодействия для различных типов плазменных волн в экранированных ДЭС – фундаментальной моды в дисках и поперечной плазмон-поляритонной моды в условно-бесконечной ДЭС. Путём тщательного подбора параметров системы удалось реализовать режим, в котором эффекты запаздывания в экранированных ДЭС проявляются сильно. Количественно охарактеризовано их влияние на перенормировку плазменной и циклотронной частот. Эти результаты точно согласуются с известными теоретическими предсказаниями [1-3]. Установлены закономерности влияния параметров системы, таких, как толщина подложки и плотность двумерных электронов, на эффекты запаздывания. Показано, что силой плазмон-фотонного взаимодействия можно управлять, изменяя концентрацию двумерных электронов либо толщину подложки. Этот результат имеет значение для создания структур интегральной плазмон-фотоники на чипе.

Также установлено, что для всех исследованных типов мод в экранированных системах параметр запаздывания имеет единый универсальный вид. Этот результат обсуждается с точки зрения феноменологического подхода [4], в котором плазменный резонанс является следствием ненулевой кинетической индуктивности ДЭС. Учёт наличия у системы ещё и электромагнитной индуктивности позволяет количественно рассчитать параметр запаздывания.

Литература

- [1] Yu.A. Kosevich, A.M. Kosevich, J.C. Granada, Phys. Lett. A 127, 52 (1988).
- [2] А.В. Чаплик, Письма в ЖЭТФ, 101, 602 (2015).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 103, 125301 (2021).
- [4] А.М. Зарезин, П.А. Гусихин, И.В. Андреев, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 113, 740 (2021).

Моделирование волноводного двунаправленного ответвителя миллиметрового диапазона

И.Ш.Бахтеев,* С.Ю.Молчанов

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

**e-mail: b1984h@yandex.ru*

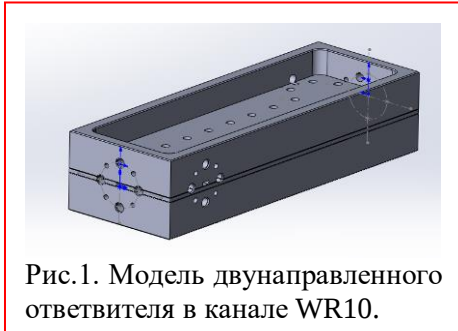


Рис.1. Модель двунаправленного ответвителя в канале WR10.

В СВЧ и КВЧ технике широко используются волноводные направленные ответвители. Эти пассивные элементы применяются как в задачах ответвления части мощности из основного тракта, так и для определения величины проходящей мощности [1]. Волноводные ответвители отличаются частотными диапазонами, уровнями ответвленной мощности, количеством ответвленных каналов и элементами связи между каналами [2]. Волноводный направленный ответвитель состоит из двух отрезков волновода,

сопряженных между собой через общую стенку (как правило широкую), на которой формируются отверстия, обеспечивающие переходное ослабление и направленность.

В работе рассмотрен двунаправленный ответвитель, конструктивно представляющий собой устройство состоящие из 3 волноводов (основной и 2 вторичных канала), связанных между собой системой круглых отверстий связи. Система круглых отверстий связи, формируемая на стенке толщиной порядка 150 мкм, имеют переменный диаметр, обеспечивая распределение волн по закону Чебышева для повышения направленности. Малый ($\pm 0,5$ дБ) перепад переходного ослабления в частотном диапазоне достигается выполнением области связи на определенном расстоянии от продольной оси волновода.

Волноводные двунаправленные ответвители миллиметрового диапазона серийно не выпускаются в России. Это связано не только с увеличением трудоемкости при моделировании по сравнению с однонаправленными ответвителями, но и сильной зависимостью выходных параметров от погрешности изготовления. Представленная конструкция двунаправленного ответвителя имеет свои особенности, обеспечивающая рабочие параметры при погрешностях в пределах заданных допусков.

Литература

- [1] Сосунов В.А., Шибяев А. А. Направленные ответвители и их применение. // Саратов, Приволж. кн. изд., 1969
- [2] Шаров Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. // М.: Горячая линия – Телеком, 2016.

Изменение продольного сопротивления в режиме квантового Холла в условиях электронного спинового резонанса

В.Е.Бисти*

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

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

Предлагается объяснение влияния микроволнового излучения на величину продольного сопротивления в условиях электронного спинового резонанса (ESR) для четных и нечетных факторов заполнения в режиме квантового эффекта Холла. В работе [1] ESR в двумерной электронной системе был исследован экспериментально вблизи четных и нечетных факторов заполнения в режиме целочисленного квантового эффекта Холла в гетероструктурах ZnO/MgZnO при $T=0.5\text{K}$. Детектирование ESR основывалось на сильной чувствительности продольного сопротивления R_{xx} двумерного канала к микроволновому излучению. Спиновый резонанс наблюдался как острый пик в изменении сопротивления δR_{xx} при медленном изменении магнитного поля при постоянной частоте микроволнового излучения. Воздействие ESR на продольное сопротивление δR_{xx} оказалось сравнимым по величине для четного и нечетного факторов заполнения, но противоположных знаков.

Наблюдаемое явление указывает на различные механизмы воздействия микроволнового излучения в зависимости от спинового состояния системы. Гетероструктуры MgZnO/ZnO относятся к сильно коррелированным системам, поэтому была использована модель Ферми-жидкости (параметры квазичастиц брались из работы [2]). В отсутствие микроволнового излучения продольное сопротивление вблизи целочисленных факторов заполнения носит активационный характер и зависит от температуры, вызывающей отклонение факторов заполнения от целочисленных значений для квазиэлектронов и квазидырок. Микроволновое поглощение в условиях ESR вызывает изменение заполнения уровней Ландау квазичастиц. Для окрестности нечетных факторов заполнения образовавшиеся возбуждения - спиновые экситоны, в процессе поглощения их число увеличивается, что можно описать увеличением температуры, приводящим к росту сопротивления. Для окрестности четных факторов заполнения поглощение невелико и зависит от отклонения фактора заполнения от целочисленного при ненулевой температуре от нулевой. Поглощение приводит к уменьшению спиновой поляризации системы (переходу возбуждений с $S_z = -1$ в возбуждения с $S_z = 0$) и как следствие уменьшению сопротивления.

Литература

- [1] A.V. Shchepetilnikov, A.R. Khisameeva, Yu.A. Nefyodov, and I.V. Kukushkin. Phys. Rev. B104, 075437 (2021).
- [2] V.V. Solov'yev and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B96, 115131 (2017).

Делитель мощности

В.Д.Бобова*

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

**e-mail: vasilina.bobova@bk.ru*

Роль техники, основанной на работе с сверхвысокочастотным диапазоном, растет с каждым годом. Необходимость работы с СВЧ связана с тем, что при работе в данном диапазоне достигается высокая направленность излучения, многоканальность за счёт большей информативности, а также малых потерь за счёт широкого окна прозрачности. Все эти качества создают базу для расширения области применения технологий, связанных с СВЧ. Более того, данное направление не получало должного внимания более 7-15 лет, что привело к тому, что имеющиеся технологии не позволяют получить достаточных мощностей и КПД, а значит имеется острая необходимость в ее развитии.

Так, одним из неотъемлемых элементов передающих систем является делитель, предназначенный для высокоточного разделения и суммирования сигнала в широком диапазоне частот. В связи с тем, что в электронике имеется тенденция к уменьшению габаритов изделия, необходим переход от традиционных технологий к микросхемам, что требует решения многих проблем, качественно отличающихся от тех, что встречаются на более низких частотах.

Переход к микрополосковым элементам является довольно трудоемким процессом, который сопровождается довольно сложным расчетом, ведь необходим учёт краевых полей, а также полей излучений, важную роль в такой операции играют системы автоматического проектирования(САПР). Также, данный процесс требует перехода к технологиям фотолитографии, реализуемая в данной работе схема делителя - мост Ланге также требует особой точности в проведении микросварки. Получаемые таким способом элементы отличаются высокой точностью, а также малым коэффициентом шума.

Целью данной работы является определение и расчет топологии микрополоскового делителя мощности на примере моста Ланге, исследование свойств полученного изделия, а также проблем, связанных с реализацией данной технологии и внедрения ее в устройство.

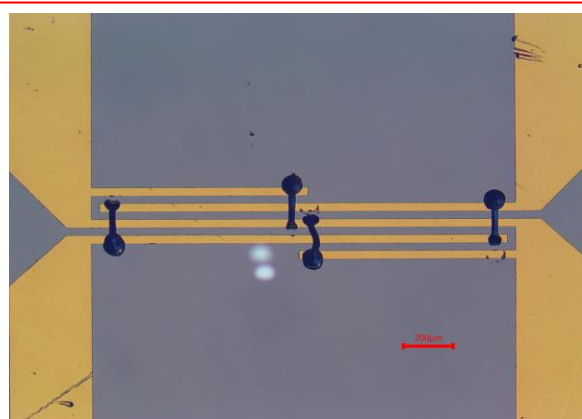


Рис.1 Топология микрополоскового делителя мощности.

Прямые и межслойные экситоны при комнатной температуре в двойных квантовых ямах на основе монослоёв MoSe_2 и WSe_2

А.С.Бричкин,* Г.М.Голышков, А.С.Черненко

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

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

Непрямые (межслойные) экситоны являются популярными объектами исследования как для изучения Бозе-газа в полупроводниковых материалах, так и для создания на их основе различных экситонных приборов и устройств. Как прямые, так и непрямые экситоны интенсивно изучались в II-VI и III-V полупроводниковых структурах, но подавляющее большинство исследований ограничивалось низкими температурами, а экситонные устройства были ограничены температурой ~ 100 K [1], тогда как в плане технологий критически важно двигаться к комнатным температурам.

Перспективными объектами для наблюдения непрямого экситона при комнатной температуре являются Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры на основе монослоёв дихалькогенидов переходных металлов, в которых экситон в атомарно тонких слоях обладает большой энергией связи ~ 500 мэВ. Для получения непрямого экситона в таких структурах используется два основных подхода. Первый вариант - это двойная яма I-типа, где электрон и дырка пространственно разнесены с помощью промежуточного барьера [2], второй вариант - это двойная квантовая яма II-типа, где электрон и дырка формируются в соседних монослоях дихалькогенидов разного типа, например MoSe_2 и WSe_2 , как в данной работе. Монослои MoSe_2 и WSe_2 располагаются между инкапсулирующими слоями гексагонального нитрида бора, которые в свою очередь расположены между слоями графита на подложке и верхнего графена, выполняющих роль обкладок конденсатора, к которым подводится внешнее напряжение. Такая шестислойная гетеструктура с проводящими контактами позволяет наблюдать в спектре ФЛ в широком диапазоне температур вплоть до комнатной прямые экситоны в монослоях MoSe_2 и WSe_2 , не прямой экситон между этими слоями, а также и исследовать их зависимость от приложенного электрического поля. Так прямой экситон WSe_2 при $T=295\text{K}$ демонстрирует чёткий линейный сдвиг по полю ~ 15 мэВ (рис.1) и заметное уширение. Линия непрямого экситона также отчётливо наблюдается в спектре ФЛ, демонстрирует сдвиг по энергии, уширение и ослабевает с ростом поля.

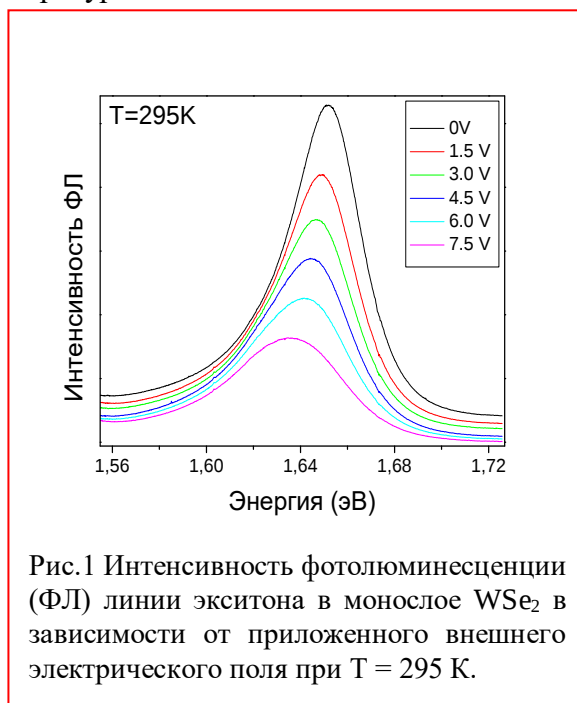


Рис.1 Интенсивность фотолуминесценции (ФЛ) линии экситона в монослое WSe_2 в зависимости от приложенного внешнего электрического поля при $T = 295$ K.

Литература

- [1] L.V. Butov «Excitonic Devices», Superlattices Microstruct. 108, 2–26 (2017).
- [2] E.V. Calman, M.M. Fogle, L.V. Butov, A.K. Geim, Nat. Commun. 9:1895 (2018).

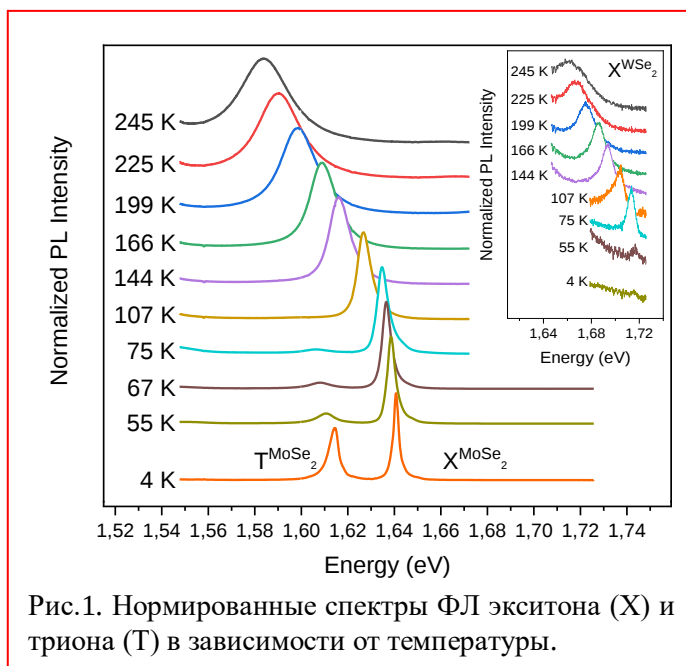
Эффект экранирования в гетероструктурах с монослоями дихалькогенидов переходных металлов

Г.М.Голышков,* А.С.Бричкин, А.В.Черненко

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

**e-mail: golyshkov.gm@phystech.edu*

Гетероструктуры на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) привлекают значительное внимание за счет своих уникальных свойств, что делает их перспективными объектами для применения в оптоэлектронных устройствах [1]. Метод



механической эксфолиации позволяет получить устойчивые к окружающей среде и к термоциклированию гетероструктуры. Это открывает путь к изучению их свойств в широком диапазоне температур, лазерной накачки, напряженности внешнего поля. Благодаря ослаблению экранирования кулоновского взаимодействия в монослоях ДПМ, энергия связи экситона оказывается чрезвычайно высокой, несколько сотен мэВ [2], что позволяет наблюдать экситонные эффекты при температурах вплоть до комнатной.

Вертикальное электрическое поле, перпендикулярное монослоям ДПМ, воздействует на основные и возбуждённые состояния экситонов,

модифицируя их спектры фотолюминесценции (ФЛ).

Линии ФЛ нейтрального (X) и заряженного экситона (триона) (Т) хорошо разрешаются в спектре ФЛ; при приложении вертикального электрического поля штарковский сдвиг линий ФЛ оказывается минимальным. Это вызвано экранированием внешнего поля электронным газом в монослое. С ростом температуры линия триона постепенно исчезает из спектра (рис.1), что связано с уменьшением плотности носителей заряда в монослое. Однако при приложении напряжения на контакты линия триона начинает доминировать в спектре. Но при температуре выше некоторой критической трион уже не наблюдается, а у нейтрального экситона появляется штарковский сдвиг от приложенного вертикального поля, который сохраняется при дальнейшем повышении температуры, что свидетельствует об ослаблении экранирования кулоновского взаимодействия.

Литература

- [1] A. Kolobov, Junji Tominaga, «Two-Dimensional Transition-Metal Dichalcogenides», Springer, 2016, pp. 538.
- [2] G. Wang, A. Chernikov, M. Glazov et al., Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018).

Плазмонная метаповерхность на основе двумерной электронной системы

К.Р.Джикирба,^{1,2*} А.С.Астраханцева,^{1,2} П.А.Гусихин,¹ В.М.Муравьев¹¹*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2*²*МФТИ, 141700, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9*

*e-mail: ki805rill@mail.ru

Терагерцовая и субтерагерцовая квазиоптика имеют широкое практическое применение в различных системах неразрушающего контроля, детектирования веществ и контроля безопасности. Инжиниринг метаструктур в данном частотном диапазоне позволяет создавать актуальные материалы с уникальными свойствами. С помощью оптической литографии мы изготовили структуру с частично вытравленной двумерной электронной системой вблизи поверхности. В эксперименте образец показал сильную анизотропию, что дает возможность использовать данный эффект для создания устройства управления фазой.

Образец представляет собой тонкую мембрану толщиной 32 мкм из GaAs с двумерной квантовой ямой на расстоянии 210 нм от поверхности. На образце была сформирована структура с периодической двумерной электронной системой с шириной вытравленной области - 15 мкм. Период структуры составлял 25 мкм. Мы теоретически и экспериментально изучили пропускание данной структуры в зависимости от поляризации падающего излучения.

Для наблюдения эффекта использовалась открытая квазиоптическая схема на измерение пропускания изучаемого образца. В качестве источника использовалась лампа обратной волны, с рабочим диапазоном от 70 до 500 ГГц. Образцы находились в криостате с оптическими окнами при температуре 5 К.

На рис.1 представлены результаты измерений. На верхней картинке показано пропускание образца со сплошной двумерной электронной системой: полыми кружками изображены экспериментальные данные, сплошной синей линией теоретическое пропускание, стрелкой указана плазменная частота, пунктиром - пропускание подложки без двумерной электронной системы. На двух нижних графиках показано пропускание образца с шириной полосок двумерной квантовой ямы - 10 мкм. Синим цветом - пропускание с поляризацией вдоль полосок, красным - поперёк, черным пунктиром пропускание без электронной системы, соответствующие классическим резонансам пропускания Фабри-Перо. Видно, что при поляризации перпендикулярной периодической структуре пропускание практически совпадает с пропусканием вовсе без двумерной электронной системы.

Эксперимент хорошо согласуется с теоретическими расчетами, сделанными при помощи компьютерного моделирования. Видно, что данная системы показывает сильную анизотропию по поляризации падающего излучения. Таким образом появляется возможность эффективно управлять амплитудой и соответственно фазой прошедшего излучения, изменяя профиль электронной структуры на субволновых масштабах.

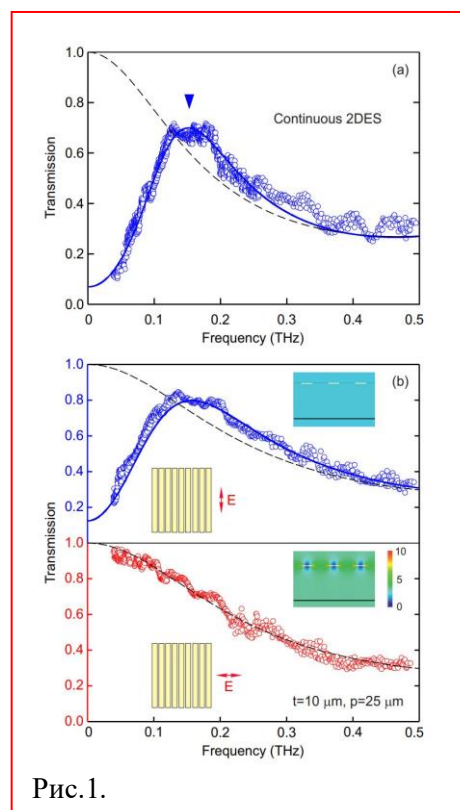


Рис.1.

Магнитная анизотропия игольчатых монокристаллических включений MnSb в матрице InSb

**А.И.Дмитриев,^{1*} А.В.Кочура,^{2,3} А.П.Кузьменко,² З.Х.Аунг,² В.В.Родионов,²
С.Ф.Маренкин,^{4,5} Б.А.Аронзон³**

¹ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Черноголовка, пр-кт Академика Семенова, д.1

²ФГБОУ ВО «ЮЗГУ», 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, д.94

³ФИАН, 119991, Москва, Ленинский пр-кт, д.53

ИОНХ РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-кт, д.31

⁵НИТУ МИСИС, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д.4

*e-mail: aid@icp.ac.ru

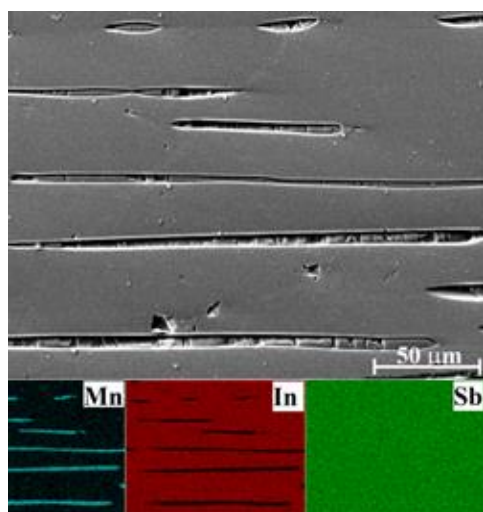


Рис.1. Сканирующее электронно-микроскопическое изображение игольчатых монокристаллических включений MnSb в матрице InSb вдоль оси роста MnSb [001] с картами распределения элементов.

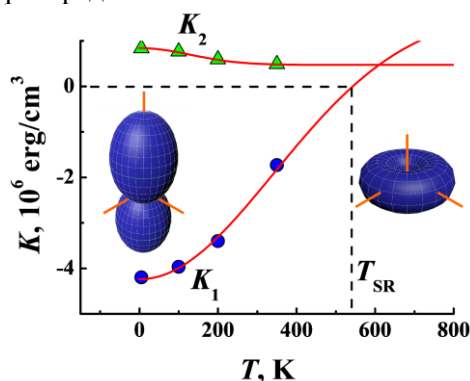


Рис.2. Температурные зависимости констант МА K_1 и K_2 . На вставках – схематические изображения поверхностей МА, соответствующих анизотропии типа «легкая ось» (справа) и «легкая плоскость» (слева).

Измерены и проанализированы зависимости намагниченности игольчатых монокристаллических включений MnSb в матрице InSb от напряженности магнитного поля $M(H)$ в интервале температур 5 – 350 К. Аппроксимации зависимостей $M(H)$ в достаточно сильных магнитных полях в рамках закона асимптотического насыщения, позволила определить константы магнитной анизотропии (МА) первого K_1 и второго K_2 порядков. Установлены температурные зависимости $K_1(T)$ и $K_2(T)$. Выполнена их аппроксимация модифицированной формулой Брюхатова-Киренского. Экстраполяция зависимости $K_1(T)$ в область высоких температур позволила предсказать температуру спин-переориентационного перехода $T_{SR} = 530$ К. Поворот оси легкого намагничивания сопровождается изменением типа магнитной анизотропии. Высоким температурам $T_{SR} > 530$ К соответствует анизотропия типа «легкая ось». Низким температурам $T_{SR} < 530$ К соответствует анизотропия типа «легкая плоскость».

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственных заданий АААА-А19-119092390079-8, 0851-2020-0035, а также РНФ (21-12-00254) и программы «Приоритет-2030» (075-15-2021-1213).

Литература

[1] А.И. Дмитриев, А.В. Кочура, С.Ф. Маренкин, Е. Lahderanta, А.П. Кузьменко, Б.А. Аронзон, Письма в ЖТФ 47, 46 (2021).

Магнетизм и магнитный фазовый переход в нанопроволоках диамагнитно-разбавленных сверхсильных магнитов $\varepsilon\text{-In}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}_3$

М.С.Дмитриева,* А.И.Дмитриев

ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Черноголовка, пр-кт Академика Семенова, д.1

**e-mail: maiyasnig@yandex.ru*

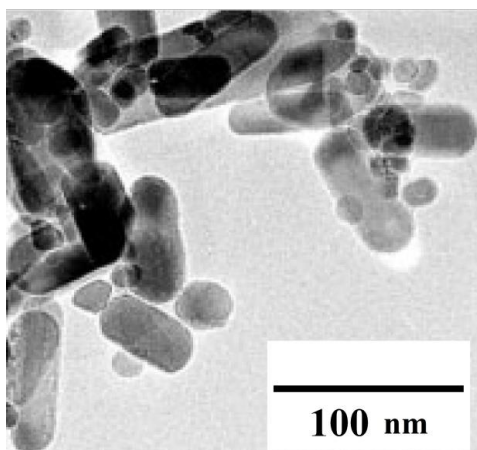


Рис.1. Изображение нанопроволок $\varepsilon\text{-In}_{0.24}\text{Fe}_{1.76}\text{O}_3$, полученное на просвечивающем электронном микроскопе.

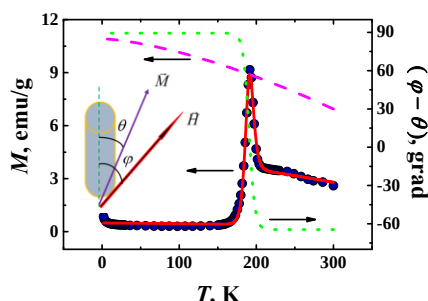


Рис.2. Температурная зависимость намагниченности нанопроволок $\varepsilon\text{-In}_{0.24}\text{Fe}_{1.76}\text{O}_3$. Сплошной линией показана аппроксимация. Штриховым пунктиром показана зависимость Блоха 3/2, когда $\varphi - \theta = 0$. Точечным пунктиром показана зависимость разности углов $\varphi - \theta$. На врезке показан способ отсчета углов φ и θ .

Обнаружено резкое уменьшение намагниченности практически до нуля упорядоченных массивов нанопроволок $\varepsilon\text{-In}_{0.24}\text{Fe}_{1.76}\text{O}_3$ в окрестности 190 К. Температурные вариации намагниченности нанопроволок описываются законом Блоха 3/2 с учетом спонтанного поворота оси их легкого намагничивания (спин-переориентационный переход). Определены механизмы перемагничивания нанопроволок и значения ключевых микроскопических параметров спиновой системы нанопроволок и обменного взаимодействия в них (спин-волновая жесткость и обменный интеграл). Установлено соответствие обменных интегралов, определенных в рамках теории элементарных магнитных возбуждений, число которых растет по закону 3/2, и приближения молекулярного поля Вейса.

Измерения магнитных свойств в области спиновой переориентации обнаруживают температурный гистерезис при охлаждении и нагревании наночастиц $\varepsilon\text{-In}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_3$, характерный для фазового перехода первого рода. Разделены вклады высокотемпературной фазы с высоким значением намагниченности и низкотемпературной фазы с низким значением намагниченности в суммарную намагниченность наночастиц $\varepsilon\text{-In}_{0.04}\text{Fe}_{1.96}\text{O}_3$. Установлены основные термодинамические закономерности магнитного фазового перехода. Определены энтальпии и энтропии, а также другие термодинамические характеристики спин-переориентационного перехода, регистрируемого в различных магнитных полях. Обнаружено, что спин-переориентационный переход является магниточувствительным.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания АААА-А19-119092390079-8.

Влияние ионного облучения на характеристики спиновых светоизлучающих диодов CoPt/GaAs/InGaAs

М.В.Дорохин, П.Б.Дёмина, И.Л.Калентьева, А.В.Здоровейцев, Ю.А.Дудин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Н. Новгород., просп. Гагарина, д.23, корп.3

*e-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Гетероструктуры на основе квантовых ям InGaAs/GaAs с ферромагнитным инжектором CoPt используются для изготовления спиновых светоизлучающих диодов (ССИД), испускающих циркулярно-поляризованное излучение. Степень циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ) в таких диодах зависит как от эффективности спиновой инжекции из намагниченного слоя CoPt, так и от спиновой релаксации и прецессии, возникающих в процессе переноса спин-поляризованных носителей от ферромагнитного инжектора к активной области ССИД [1]. Различные технологические воздействия на приповерхностную область ССИД, в частности, облучение ионами He^+ изменяет условия спиновой релаксации и, соответственно, степень поляризации ЭЛ.

В настоящей работе исследованы светоизлучающие диоды на основе структур InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt. Полупроводниковая часть ССИД сформирована методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках *n*-GaAs (100). Затем, методом электронно-лучевого испарения в вакууме при 300°C, формировался ферромагнитный инжектор на основе сплава Co₄₅Pt₅₅ толщиной ~ 8 нм [2]. С применением фотолитографии и химического травления изготавливались мезоструктуры диодов диаметром 500 мкм. Диодные структуры облучались на ускорителе ИЛУ-3 ионами He^+ с флюенсом $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и энергией 20 кэВ. Исследовалось влияние ионного облучения на вольтамперные характеристики (ВАХ), интенсивность электролюминесценции ($I_{\text{ЭЛ}}$) и степень циркулярной поляризации электролюминесценции ($P_{\text{ЭЛ}}$).

Установлено, что при ионном облучении $I_{\text{ЭЛ}}$ диодов снижается более чем на порядок величины, вследствие проникновения дефектов в активную область. При этом наблюдается увеличение степени циркулярной поляризации приблизительно в 4 раза для структур с толщинами покровного слоя GaAs равными 150 и 175 нм (до 1% и 1.3% соответственно). Также, установлено снижение обратного тока на порядок величины до значений $1 \times 10^{-7} \text{ А}$ при напряжении 2 В. Полученные результаты могут представлять интерес для технологии приборов спиновой оптоэлектроники.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 21-79-20186).

Литература

[1] М.В. Дорохин и др., ФТТ, 59, 2135 (2017).

[2] А.В. Здоровейцев и др., ФТТ, 58, 2186 (2016).

Использование субмикронных стеклянных капилляров в качестве зонда в АСМ-манипуляторе

А.А.Жуков^{1*}, А.С.Бричкин¹, А.В.Черненко¹, В.В.Дремов², Л.О.Елесин², Н.А.Баринов², Д.В.Клинов

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

²*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.*

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

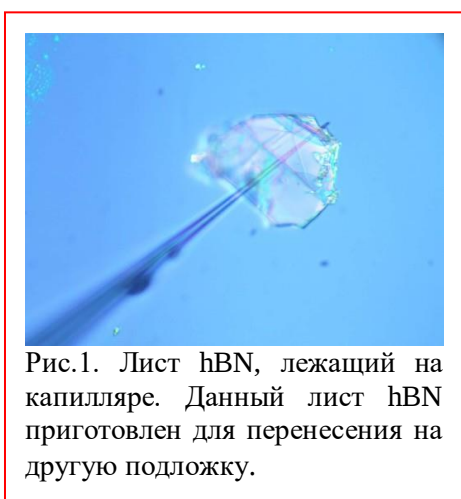


Рис.1. Лист hBN, лежащий на капилляре. Данный лист hBN приготовлен для перенесения на другую подложку.

В настоящее время особое внимание уделяется созданию структур микронного и субмикронного размера при помощи различных микро- и нано-манипуляторов. Данный интерес продиктован как возможностью создания полевых транзисторов на основе полупроводниковых нановискеров с различным уровнем допирования, так и созданием Ван-дер-Ваальсовых образцов, демонстрирующих новый подход к формированию гетероструктур, которые невозможно создать при использовании стандартного метода молекулярно-лучевой эпитаксии.

В данном докладе приведен пример успешного применения капилляров субмикронного диаметра в качестве зонда в АСМ-манипуляторе [1]. Показана возможность получения информации о топографии

создаваемого и исследуемого объекта, получены спектры отклика кварцевого резонатора в полуконтактном динамическом режиме работы АСМ-манипулятора, приведены примеры использования данного типа зонда в микрофлюидике.

Отдельно следует отметить возможность успешного применения микрокапилляров для механического перемещения с субмикронной точностью нановискеров с характерным диаметром порядка 100 нм, а также пластин гексагонального нитрида бора (hBN) с характерными размерами от субмикронных до порядка сотен микрон. Было показано, что лист hBN, свободно положенный на подложку из оксида кремния, остается подвижен благодаря тонкой водяной пленке, образующейся на поверхности оксида при относительной влажности более 10%. Следует отдельно отметить, что в то время как перемещение нановискеров возможно и при применении стандартных металлических зондов, перемещение пластин hBN микронных размеров оказывается возможным только при использовании стеклянных капилляров в качестве зонда.

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-22-00141.

Литература

[1] A.A. Zhukov, V.S. Stolyarov and O.V. Kononenko, Rev. Sci. Instrum. 88, 063701 (2017).

Трековые мембраны с наноструктурированным слоем серебра, модифицированные ДНК-аптамером, для обнаружения единичных вирусов гриппа А в биологических жидкостях

Е.Г.Завьялова,¹ В.И.Кукушкин,² А.Н.Нечаев³

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 3

²ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

³Объединенный институт ядерных исследований, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Аптамеры – структурированные фрагменты одноцепочечных нуклеиновых кислот, специфически связывающие аналиты разной природы. Константы диссоциации комплексов аптамер-белок находятся в диапазоне 10^{-12} - 10^{-8} М, что сопоставимо с аффинностью антител. В отличие от других узнающих элементов, аптамер можно разработать к аналиту любого класса, а сами аптамеры получают автоматическим химическим синтезом, при этом есть возможность сайт-специфического введения модификаций. Эти обстоятельства делают аптамеры на основе нуклеиновых кислот привлекательными узнающими элементами, которые могут быть применены для создания биосенсоров.

Аптасенсоры, биосенсоры на основе аптамеров, активно разрабатываются с привлечением самых разных принципов детекции: от спектроскопических методов до электрохимических устройств. Одно из перспективных сочетаний – сочетание аптамеров, как высокоспецифичных узнающих элементов, и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), как высокочувствительного метода определения аналитов. Одна из важных задач современности – специфическое высокочувствительное определение вирусов с помощью экспресс-тестов. Мы предложили несколько ГКР-аптасенсоров со временем анализа менее 15 минут.

Один из аптасенсоров использует мембраны для фильтрации, на которые нанесен URH-активный слой наночастиц серебра и хрома. Такой подход позволяет эффективно адсорбировать вирусы из раствора на наночастицах серебра, покрытых аптамером. Специфическое определение вирусов было обеспечено с помощью ДНК-аптамера для вируса гриппа А, меченого комбинационно-активной меткой. ГКР-сигнал от метки уменьшался со снижением концентрации вируса-мишени. Даже несколько вирусных частиц в образце обеспечивали увеличение интенсивности ГКР-спектров, требуя всего несколько минут для взаимодействия между аптамером и вирусом. Предел обнаружения аптасенсора составлял всего 10 вирусных частиц в мл вируса гриппа А или 2 вирусные частицы в пробе. Это значение ниже предела обнаружения методом полимеразной цепной реакции с обратной транскрипцией (10^3 вирусных частиц в мл).

Предложенный сенсор интересен возможностью концентрирования аналита из большого объема образца. Данные сенсоры позволяют отфильтровать низкомолекулярные соединения, соли и белки, содержащиеся в исследуемых биологических пробах, и дают возможность специфического определения различных вирусов.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ [№ 18-74-10019, <https://rscf.ru/project/18-74-10019/>].

Затухание плазменных колебаний в латерально ограниченных двумерных электронных системах

И.В.Загороднев, * Д.А.Родионов, А.А.Заболотных, В.А.Волков

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

**e-mail: zagorodnev@phystech.edu*

Электромагнитный отклик композитных материалов, состоящих из проводящих включений, вызывает большой интерес и активно исследуется в наноплазмонике и нанофотонике. Основное внимание уделяется случаю, когда длина волны электромагнитного излучения много больше размеров включений. В этом случае, как правило, можно пренебречь эффектами электромагнитного запаздывания, т.е. при описании микроскопических полей внутри включения считать, что скорость света равна бесконечности. Недавно в полупроводниковых гетероструктурах на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs, в которых носители заряда имеют высокую подвижность, было исследовано поглощение микроволнового излучения в больших (до нескольких мм) дисках, т.е. в режиме, когда длина волны электромагнитного излучения сравнима с размерами диска [1,2]. Оказалось, что в этом режиме ширина линии и добротность плазменных резонансов с ростом роли электромагнитного запаздывания увеличивается быстрее, чем ожидалось. Эти результаты послужили мотивацией для нашей работы.

В данной работе с учетом электромагнитного запаздывания проанализированы плазменные моды в двумерной электронной системе, имеющей форму диска, см. рис. Для проводимости системы использована модель Друде. В случае слабого электромагнитного запаздывания найдены аналитические выражения для положения и ширины фундаментальной (дипольной) и осесимметричной (квадрупольной) мод. В практически интересном случае, когда частота плазменных волн больше обратного времени релаксации (столкновительного уширения), положение резонансов слабо зависит от времени релаксации, в то время как затухание мод существенно зависит от соотношения между столкновительным и излучательным уширением. При этом затухание даже при малом запаздывании не является простой суммой двух уширений, а содержит дополнительные («интерференционные») слагаемые.

Работы выполнены за счет средств гранта РФФИ 21-12-00287.

Литература

- [1] I.V. Kukushkin, J.H. Smet, S.A. Mikhailov et al., Phys. Rev. Lett. 90, 156801 (2003).
- [2] P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, A.A. Zagitova et al., Phys. Rev. Lett. 121, 176804 (2018).
- [3] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials 13, 975 (2023).
- [4] D.A. Rodionov, I.V. Zagorodnev, Phys. Rev. B 106, 235431 (2022).

Обнаружение эффектов гибридизации магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах в форме квадрата

А.М.Зарезин^{1,2*} В.М.Муравьев,¹ П.А.Гусихин,¹ И.В.Кукушкин¹

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

²МФТИ (НИУ), 141701, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д.9

*e-mail: zarezin.am@phystech.edu

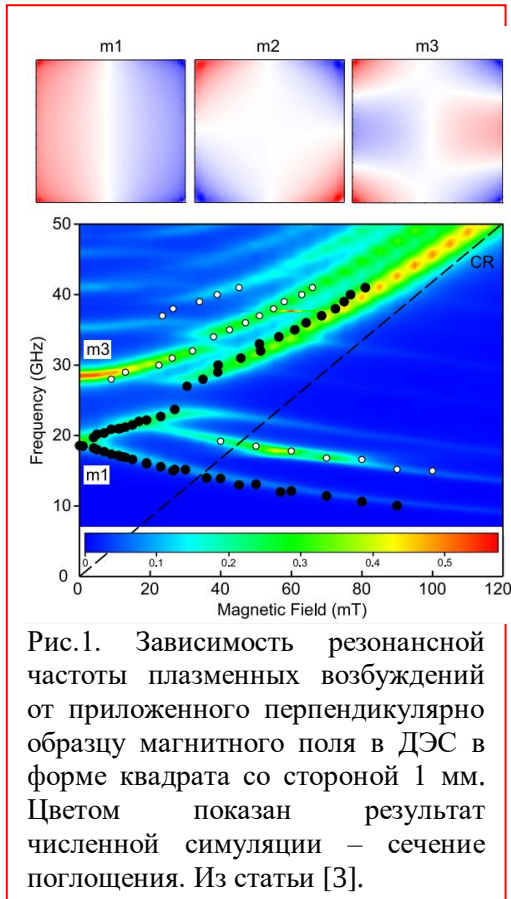


Рис.1. Зависимость резонансной частоты плазменных возбуждений от приложенного перпендикулярно образцу магнитного поля в ДЭС в форме квадрата со стороной 1 мм. Цветом показан результат численной симуляции – сечение поглощения. Из статьи [3].

Электромагнитный отклик двумерных электронных систем (ДЭС) существенно отличается от случая трехмерных систем. В частности, свойства двумерных плазменных возбуждений можно изменять в широком диапазоне, меняя концентрацию электронов, прикладывая магнитное поле или модифицируя диэлектрическое/металлическое окружение ДЭС.

Помимо вышеупомянутых параметров, на свойства плазменных возбуждений в ДЭС также значительно влияет геометрия системы. Наиболее изученной геометрией ДЭС является геометрия диска. Для геометрии диска [1,2] каждая плазменная мода (за исключением осесимметричных) расщепляется на краевую и объемную моды в ненулевом магнитном поле. При этом разные магнитоплазменные моды не взаимодействуют друг с другом.

Существует еще одна конфигурация ДЭС, представляющая интерес. Геометрия квадрата является наиболее простой с точки зрения технологии изготовления. Однако, переход от геометрии диска к геометрии квадрата связан с существенным понижением симметрии системы. Физические свойства плазменных возбуждений в ДЭС в форме квадрата были изучены меньше всего

по сравнению с остальными геометриями.

В работе [3] представлено исследование плазменных возбуждений в ДЭС в форме диска и в форме квадрата. Эксперименты проводились на GaAs/AlGaAs гетероструктурах при гелиевых температурах в криостате со сверхпроводящим соленоидом. Было впервые обнаружено [3], что в ДЭС в форме квадрата различные магнитоплазменные моды взаимодействуют друг с другом (рис. 1). Данный эффект отсутствует в хорошо изученной теоретически и экспериментально геометрии диска [1,2].

Литература

- [1] Alexander L. Fetter, Phys. Rev. B 33, 5221 (1986).
- [2] B D. C. Glattli, E. Y. Andrei, G. Deville, J. Poitrenaud, and F. I. B. Williams, Phys. Rev. Lett. 54, 1710 (1985).
- [3] 6. A. M. Zarezin, D. Mylnikov, A. S. Petrov, D. Svintsov, P. A. Gusikhin, I. V. Kukushkin, and V. M. Muravev, Phys. Rev. B. 107, 075414 (2023).

Моделирование влияния магнетоплазменного поглощения на осцилляции сопротивления, индуцированные микроволновым излучением

А.А.Капустин,* С.И.Дорожкин

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

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

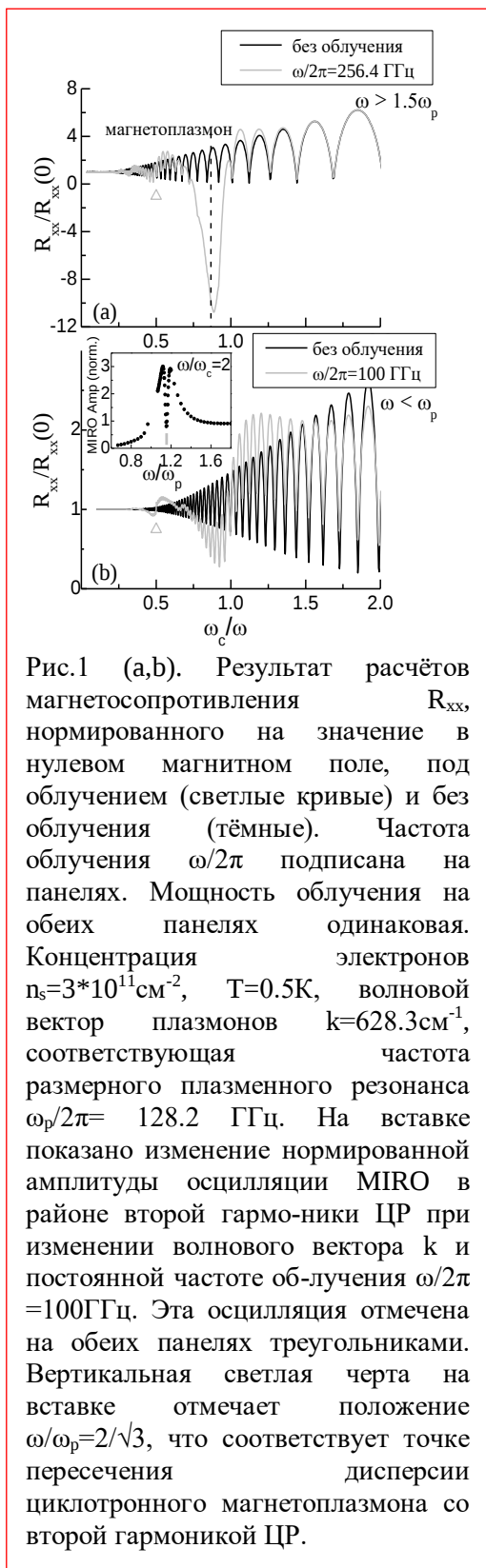


Рис.1 (a,b). Результат расчётов магнетосопротивления R_{xx} , нормированного на значение в нулевом магнитном поле, под облучением (светлые кривые) и без облучения (тёмные). Частота облучения $\omega/2\pi$ подписана на панелях. Мощность облучения на обеих панелях одинаковая. Концентрация электронов $n_s=3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $T=0.5 \text{ K}$, волновой вектор плазмонов $k=628.3 \text{ см}^{-1}$, соответствующая частота размерного плазменного резонанса $\omega_p/2\pi=128.2 \text{ ГГц}$. На вставке показано изменение нормированной амплитуды осцилляции MIRO в районе второй гармоники ЦР при изменении волнового вектора k и постоянной частоте облучения $\omega/2\pi=100 \text{ ГГц}$. Эта осцилляция отмечена на обеих панелях треугольниками. Вертикальная светлая черта на вставке отмечает положение $\omega/\omega_p=2/\sqrt{3}$, что соответствует точке пересечения дисперсии циклотронного магнетоплазмона со второй гармоникой ЦР.

Для двумерной электронной системы выполнены расчеты микроволнового фотоотклика в магнетосопротивлении, обусловленного неравновесным заполнением спектра Ландау. Использовалась модель, аналогичная [1], но особенностью выполненных расчетов явилось рассмотрение коллективного магнетоплазменного поглощения излучения [2] вместо одночастичного друдевского. В этом случае резонансная частота поглощения зависит от волнового вектора и может заметно отличаться от циклотронной частоты электронов ω_c . Оказалось, однако, что и при таком механизме поглощения индуцированные излучением частоты ω магнетоосцилляции сопротивления (MIRO) возникают на гармониках циклотронного резонанса $n=\omega/\omega_c=1,2, \dots$ независимо от частоты магнето-плазменного резонанса. Изменение этой частоты приводит к изменению амплитуды осцилляций, как это демонстрируется на рисунке. На гармониках $n \geq 2$ амплитуда MIRO меняется с частотой магнето-плазменного резонанса немонотонно. Для $n=2$ соответствующее изменение показано на вставке Рис.1b в зависимости от отношения ω/ω_p , где ω_p – плазменная частота в нулевом магнитном поле. В отличие от гармоник, амплитуда осцилляции MIRO на $n=1$ с ростом отношения ω/ω_p монотонно растет. Кроме этого, при $\omega > \omega_p$ в фотоотклике на осцилляции MIRO накладывается резонансная особенность магнетосопротивления на частоте магнетоплазмона. Это приводит к возникновению глубокого провала магнетосопротивления (см. неустойчивое состояние $R_{xx} < 0$ на Рис.1a).

Литература

- [1] И.В. Печенежский, С.И. Дорожкин, И.А. Дмитриев, Письма в ЖЭТФ 85, 94 (2007).
- [2] A.V. Chaplik, D. Heitmann, J. Phys. C: Solid State Phys. 18, 3357 (1985).

Ферромагнитный переход сильнокоррелированной двумерной электронной системы при нецелочисленных факторах заполнения

А.Б.Ваньков,^{1,2} А.С.Кореев,^{1*} П.С.Бережной,^{1,2} И.В.Кукушкин^{1,2}

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

²НИУ «Высшая Школа Экономики», 10100, Москва, ул. Мясницкая, д. 20

*e-mail: Koreyev.Alexis@yandex.ru

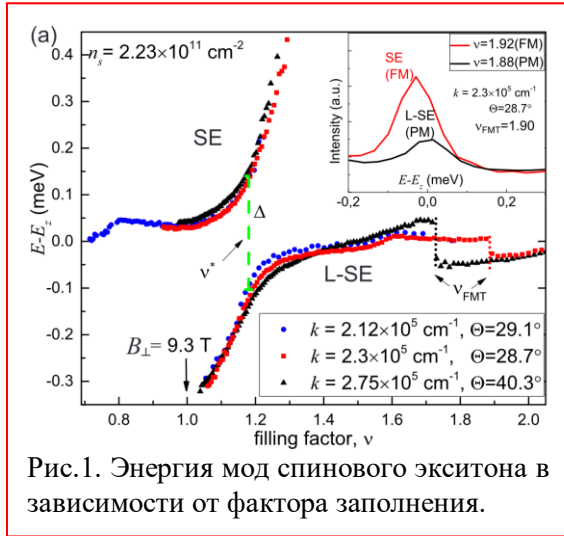


Рис.1. Энергия мод спиновго экситона в зависимости от фактора заполнения.

Спиновые текстуры в двумерных электронных системах (ДЭС) стали захватывающим полем для исследований. Их появление возможно при отклонении системы от целочисленного заполнения уровней Ландау. Они наблюдались в системах как со слабым кулоновским взаимодействием [1,2], так и с сильным [3]. В данной работе были исследованы условия возникновения спиновых текстур в сильнокоррелированных системах при изменении энергетических параметров.

Низкотемпературные эксперименты по неупругому рассеянию света (НРС) проводились на высококачественных гетероструктурах MgZnO/ZnO с концентрациями электронов в двумерном

канале, превышающими 10^{11} cm^{-2} .

В результате были обнаружены признаки существования спиновой текстуры при факторе заполнения $1 < \nu < \frac{3}{2}$ в виде дополнительной спиновой моды (рис. 1). Энергия этой моды также претерпевала скачок при $\frac{3}{2} < \nu < 2$. В соответствии с результатами, полученными методом численного моделирования, появление и энергетический скачок дополнительной моды связаны с изменением магнитного порядка системы. При увеличении фактора заполнения от $\nu = 1$ к $\nu = \frac{3}{2}$ магнитный порядок плавно изменяется с образованием текстур, а при дальнейшем увеличении в сторону $\nu = 2$ происходит резкий переход из парамагнетика в ферромагнетик. При увеличении наклона образца в магнитном поле оба перехода смещаются друг к другу, пока во всей области $1 < \nu < 2$ порядок не становится ферромагнитным. При том же критическом угле наклона в транспортном исследовании [4] наблюдалось состояние КЭХ $\nu = \frac{3}{2}$.

Литература

- [1] Y. Gallais, J. Yan, A. Pinczuk, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. 100, 086806 (2008).
- [2] I. K. Drozdov, L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, V. E. Kirpichev, I. V. Kukushkin, S. Schmult, and W. Dietsche, Phys. Rev. Lett. 104, 136804 (2010).
- [3] A.B. Van'kov, A.S. Koreyev, P.S. Berezhnoy, I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B. 106, 245308 (2022).
- [4] J. Falson, D. Maryenko, B. Friess, D. Zhang, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet, M. Kawasaki, Nature Physics 11, 347 (2015).

Эффект слабой антилокализации в AlAs/AlGaAs квантовой яме

**С.А.Лопатина^{1,2*} А.В.Щепетильников,² А.Р.Хисамеева,² А.А.Дрёмин,²
И.В.Кукушкин²**

¹НИУ «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 11

²ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика
Осипьяна д.2

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

Возникновение квантовых поправок к проводимости основано на существовании замкнутых диффузионных траекторий, на которых электроны могут интерферировать с самими собой. Этот квантово-механический эффект может приводить как к росту сопротивления двумерного канала за счет конструктивной интерференции (такое явление принято называть слабой локализацией), так и к уменьшению сопротивления (слабой антилокализацией, соответственно). Известно, что оба перечисленных эффекта разрушаются при приложении магнитного поля.

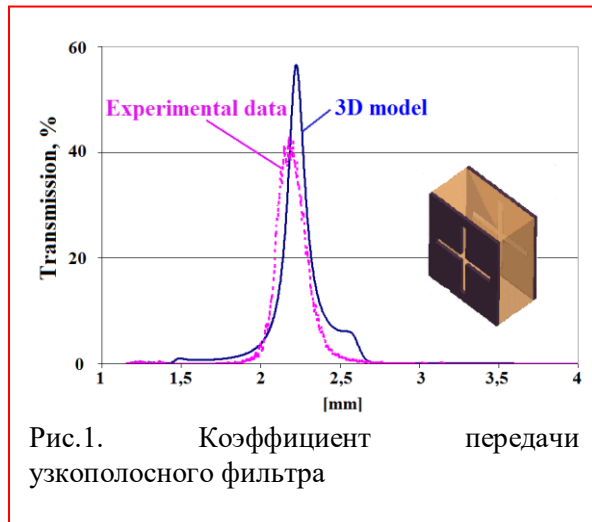
Большинство теорий, описывающих квантовые поправки к проводимости имеют одночастичную природу, поэтому особенную актуальность имеет исследование этих особенностей в сильно-коррелированных системах. В этой работе были исследованы эффекты слабой антилокализации в узкой AlAs квантовой яме. Большая эффективная масса данного материала обеспечивает доминирование электрон-электронного взаимодействия над кинетической энергией, следовательно, наблюдаемая физика будет проявлять более сложные эффекты, свойственные сильно-коррелированным системам, такие как: Вигнеровская кристаллизация, Стонеровский ферромагнитный переход в режиме квантового эффекта Холла.

В рамках данной работы [1] впервые был экспериментально установлен эффект слабой антилокализации в узкой AlAs квантовой яме. Константа спин-орбитального взаимодействия β была независимо определена с помощью двух методик: по магнитолевой зависимости g-фактора электрона, полученной с помощью спектроскопии ЭПР [2], а также с помощью аппроксимации экспериментальных данных теоретической моделью [3] с двумя параметрами: константой спин-орбитального взаимодействия β и временем сохранения фазовой когерентности τ_ϕ . Стоит отметить хорошее согласование теории и эксперимента в диапазоне магнитных полей от нуля до B_{tr} – транспортного магнитного поля, при котором длина свободного пробега совпадает с магнитной длиной. При больших магнитных полях диффузионное приближение не применимо. Количественное согласие между полученными разными способами величинами β происходит при введении перенормировки эффективной массы электрона, возникающей за счет сильных многочастичных эффектов.

Литература

- [1] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, A. A. Dremin, I. V. Kukushkin JETP Letters **115**, issue 9 (2022)
- [2] A.V. Shchepetilnikov, D.D. Frolov, Yu.A. Nefyodov, I.V. Kukushkin, L. Tiemann, C. Reichl, W. Dietsche, and W. Wegscheider, Phys. Rev. B **98**, 241302(R) (2018).
- [3] A. Punnoose, Appl. Phys. Lett. **88**, 252113 (2006).

Узкополосный фильтр КВЧ диапазона

С.Ю.Молчанов,* И.Ш.Бахтеев*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: canishe@yandex.ru*

Частотно-селективные поверхности (ЧСП) в виде вырезов произвольной конфигурации в металле находят применение в качестве фильтров электромагнитного излучения. Вопросы математического моделирования ЧСП с крестообразными периодически повторяющимися вырезами получили развитие в ряде работ зарубежных и отечественных авторов [1-3]. Длина крестообразного выреза должна подбираться исходя из требуемой частоты резонанса. Ширина креста и толщина металлической поверхности в общем случае определяют полосу пропускания фильтра.

Создание узкополосного фильтра в КВЧ диапазоне (полоса пропускания $<10\%$) требует применение нескольких таких поверхностей, удаленных на определенное расстояние друг от друга [4]. В работе проведены исследования влияния расстояния между поверхностями с крестообразными вырезами на амплитудно-частотные характеристики фильтра и показаны варианты диэлектрического заполнения для изменения полосы пропускания.

Литература

- [1] Munk B. A. Frequency-selective surfaces and periodic structures / B.A. Munk, J. D. Kraus, Ed., R. J. Marhefka, Antennas for All Applications, Ed., 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] Kuznetsov S.A. Passive metal mesh based quasi-optical selective components for subterahertz and terahertz applications / S.A. Kuznetsov, A.V. Arzhannikov, V.V. Kubarev [et al.], Proceedings of the 39th European Microwave Conference. – 2009. – Rome. Italy. – P.826-829.
- [3] Мещанов В.П. Разработка и моделирование двумерных периодических структур для узкополосной фильтрации сигналов / В.П. Мещанов, С.А. Алавердян, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, Радиотехника. – 2014. – № 10. – С.9-13.
- [4] Молчанов С.Ю. Фильтр для миллиметрового диапазона длин волн с узкой полосой пропускания / С.Ю. Молчанов, Н.М. Ушаков, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов, Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 49-52.

Происхождение аномального спинового резонанса в сильно коррелированной электронной системе

Г.А.Николаев,^{1*} А.Р.Хисамеева,¹ С.А.Лопатина,^{1,2} А.В.Щепетильников,¹ И.В. Кукушкин¹

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

²*НИУ «Высшая Школа Экономики», 10100, Москва, ул. Мясницкая, д. 11*
*e-mail: nikolaevgk@gmail.com

В работе был изучен электронный спиновый резонанс (ЭПР) в двумерной сильно коррелированной электронной системе в гетеропереходе ZnO/MgZnO в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ). Последовательно изменяя угол наклона магнитного поля к нормали образца, индуцировался ферромагнитный фазовый переход вблизи номинально немагнитных чётных факторов заполнения [1]. Изменение спиновых свойств электронной системы, связанное с фазовым переходом, изучалось методом возбуждения ЭПР. Детектирование спинового резонанса было основано на чрезвычайной чувствительности продольного сопротивления двумерной системы к поглощению микроволнового излучения [2]. Так, ЭПР наблюдался как пик в продольном сопротивлении при фиксированной частоте облучения при изменении магнитного поля.

На нечетных факторах заполнения, как и ожидалось, реализуется ферромагнитное основное состояние и пик ЭПР направлен по увеличению сопротивления. Такое поведение спинового резонанса широко изучено в системах со слабым межэлектронным взаимодействием и вызывается резонансным нагревом двумерной электронной системы вследствие интенсивного поглощения электромагнитного излучения. На чётных факторах заполнения при нулевом угле наклона основное состояние системы считается парамагнитным, поэтому ЭПР наблюдаться не должен. Тем не менее, спиновый резонанс детектируется на чётных факторах, причем пик ЭПР ориентирован в сторону уменьшения сопротивления [3]. Такое аномальное поведение противоречит предыдущим экспериментальным наблюдениям, сделанным на электронных системах с малой силой электрон-электронного взаимодействия.

В данной работе было показано, что двумерная электронная система во время аномального спинового резонанса ведёт себя так, словно она охлаждается вследствие интенсивного поглощения электромагнитного излучения. Более того, постепенное увеличение угла наклона позволило нам проследить эволюцию ключевых характеристик ЭПР по мере того, как система непрерывно приближалась к ферромагнитному фазовому переходу. Удивительно, но при переходе в ферромагнитное состояние на чётных факторах заполнения КЭХ электронный спиновый резонанс возвращал свое обычное “нагревательное” поведение. Также была предложена качественная физическая модель, которая на основе неравновесного перераспределения возбуждений, характеризующихся одновременно переворотом спина и изменением номера уровня Ландау, объясняет происхождение аномального ЭПР.

Литература

- [1] Van'kov, A. B., B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin. Phys. Rev. B 96, 235401 (2017).
- [2] Stein, D., K. V. Klitzing, and G. Weimann. Phys. Rev. Lett. 51, 130 (1983).
- [3] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, Y. A. Nefyodov, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 104, 075437 (2021).

Анализ криптографической стойкости магистрального протокола квантового распределения ключа, предполагающего использование оптических усилителей

В.А.Пастушенко*

Terra Quantum AG, Kornhausstrasse 25, CH-9000 St. Gallen, Switzerland

**e-mail: pastushenko.valeriia@gmail.com*

Оптические протоколы квантового распределения ключа (КРК), обеспечивающие безусловную секретность, эффективно работают лишь в случае сравнительно небольших расстояний в силу экспоненциального затухания сигнала в квантовых каналах (в оптических волокнах). Оптические усилители, установленные вдоль линии связи с целью компенсировать естественные потери представляют собой потенциально решение данной проблемы. Однако, стандартные протоколы КРК подразумевают использование крайне низких интенсивностей сигнальных состояний, которые подавляются шумами, возникающими вследствие спонтанного излучения, происходящего в активной среде усилителя.

Рассматривая квантовую передачу данных как сугубо физический процесс и используя ограничения квантовой термодинамики [1-3], мы получаем возможность сузить множество атак на протоколы КРК, которые могут пройти незамеченными для легитимных пользователей, что в свою очередь открывает возможности для использования высокоинтенсивных сигнальных состояний и, как следствие, оптических усилителей.

В работе рассмотрен пример однонаправленного протокола квантового распределения ключа, разработанного специально для реализации на глобальных расстояниях, проведен анализ его криптостойкости (проведена оценка информации, доступной потенциальному перехватчику, совершающему атаку, состоящую в отведении доли сигнала, проходящего по оптоволокну). В приведенном анализе учтено влияние дополнительных корреляций, наводимых между системами легитимного получателя и перехватчика из-за использования оптических усилителей. В работе также предложена эффективная процедура пост-селекции, использование которой приводит к уменьшению влияния упомянутых корреляций. С использованием численных методов были найдены оптимальные параметры для реализации данного протокола и достижимые скорости генерации секретного ключа. Результаты исследования показывают, что предлагаемый протокол имеет высокую эффективность на беспрецедентно больших расстояниях порядка тысяч километров [4].

Литература

- [1] Lesovik, G. B., Sadovskyy, I. A., Suslov, M. V., Lebedev, A. V. & Vinokur, V. M. Arrow of time and its reversal on the IBM quantum computer. *Sci. Rep.* 9, 4396 (2019).
- [2] Kirsanov, N. S. et al. Entropy dynamics in the system of interacting qubits. *J.Russ. Laser Res.* 39, 120–127 (2018).
- [3] Lesovik, G. B., Lebedev, A. V., Sadovskyy, I. A., Suslov, M. V. & Vinokur, V. M. H-theorem in quantum physics. *Sci. Rep.* 6, 32815 (2016).
- [4] N. S. Kirsanov, V. A. Pastushenko, A. D. Kodukhov, M. V. Yarovikov, A. B. Sagingalieva, D. A. Kronberg, M. Pflitsch, V. M. Vinokur, Forty Thousand Kilometers Under Quantum Protection. *arXiv:2301.10610 [quant-ph]* (2023).

Аутентификация участков протяжённых волоконно-оптических линий связи с помощью паттернов обратно рассеянного излучения

М.В.Яровиков, А.С.Смирнов,* Е.В.Жданова, А.В.Гутор, М.Ю.Вяткин

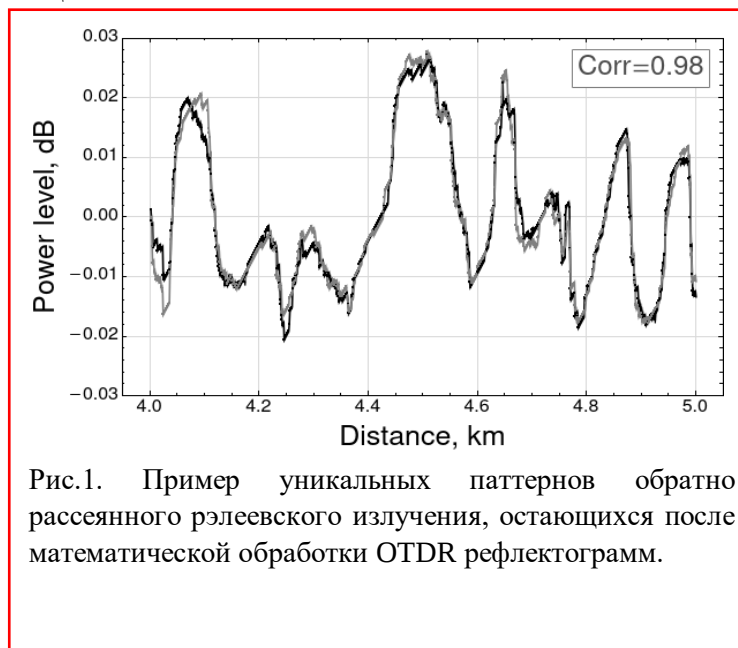
Terra Quantum AG, Kornhausstrasse 25, CH-9000 St. Gallen, Switzerland

**e-mail: asm@terraquantum.swiss*

В представленной работе показана возможность проведения аутентификации протяжённых волоконно-оптических линий связи и их пользователей при помощи анализа обратно рассеянного рэлеевского излучения.

В подходе используется технология Optical Time Domain Reflectometry (OTDR [1]). Рефлектометр усредняет обратно рассеянное излучение, происходящее на неоднородностях показателя преломления волоконного материала. При этом флуктуации показателя преломления приводят к появлению уникальных паттернов. Технологические особенности производства оптоволоконного световода гарантируют неповторимость паттернов даже для стандартного телекоммуникационного волокна. Структура паттернов оказывается хорошо воспроизводимой со временем (рис.1).

В рамках работы было экспериментально проверено, что воспроизводимость сохраняется спустя длительное время. Также проверено, что паттерны различны для разных участков волокна и разных длительностей зондирующих импульсов. Доказано, что структура паттернов является физически неклонируемой функцией (PUF [2]). Предложен алгоритм аутентификации волоконно-оптической линии связи, а также легитимных пользователей, работающих с ней.



Литература

- [1] M.K. Barnoski, M.D. Rourke, S.M. Jensen and R.T. Melville, Optical time domain reflectometer, Appl. Opt. 16, 2375-2379 (1977).
- [2] T. McGrath, I.E. Bagei, Z.M. Wang, U. Roedig and R.J. Young, A puf taxonomy, Appl. Phys. Rev. 6, 011303 (2019).

Влияние экситонного резервуара на параметрическое поляритонное рассеяние в мезоструктурах на основе GaAs микрорезонаторов

С.Н.Терешко,* А.А.Деменев

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

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

В статье С.С. Гаврилова [1] было предсказано необычное поведение мультистабильного отклика экситон-поляритонной системы в мезоструктурах в виде правильных многоугольников на высокочастотном микрорезонаторе. Вследствие сниженной относительно C_∞ симметрии в квадратных мезоструктурах при определённых параметрах накачки ожидается усиление рассеяния в состояниях с $\mathbf{k} = (\pm k_{\text{res}}; 0)$ и $(0; \pm k_{\text{res}})$, где планарный квазиимпульс k_{res} зависит от параметров микрорезонатора и длины волны лазера накачки.

В настоящей работе исследовались мезоструктуры, которые представляли собой планарный GaAs/AlAs микрорезонатор с $Q \sim 10^4$ и малым отрицательным детюнингом с вытравленными на нём квадратами размерами 60 мкм. Для наблюдения описанных в статье эффектов использовался одномодовый перестраиваемый Ti:Sp лазер в геометрии пропускания, сфокусированный на образец в пятно размером 50 мкм по нормали к структуре так, что возбуждались состояния в $\mathbf{k} = 0$. Для создания дополнительной экситонной плотности использовался одномодовый зелёный лазер подсветки (532 нм).

Зависимость интенсивности сигнала пропускания от мощности накачки одномодовым лазером представлена на рис.1а. При небольших мощностях накачки наблюдался квазилинейный рост сигнала пропускания, а в области накачек в районе 140 мВт система демонстрировала пороговый рост сигнала (рис.1а). При слабой подсветке зелёным лазером поведение экситон-поляритонной системы не изменялось при мощностях $P_{\text{grn}} \sim 3 \text{ мкВт}$, но при большей мощности $\sim 100 \text{ мкВт}$ созданная заселённость экситонного резервуара повышает интенсивность сигнала пропускания в случае, когда система находится ниже порога (рис.1б), и понижает её в случае, когда мощность лазера накачки выше порога, как для сигнала в $\mathbf{k} = 0$, так и для сигнала в $\pm k_{\text{res}}$ (рис.1с).

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

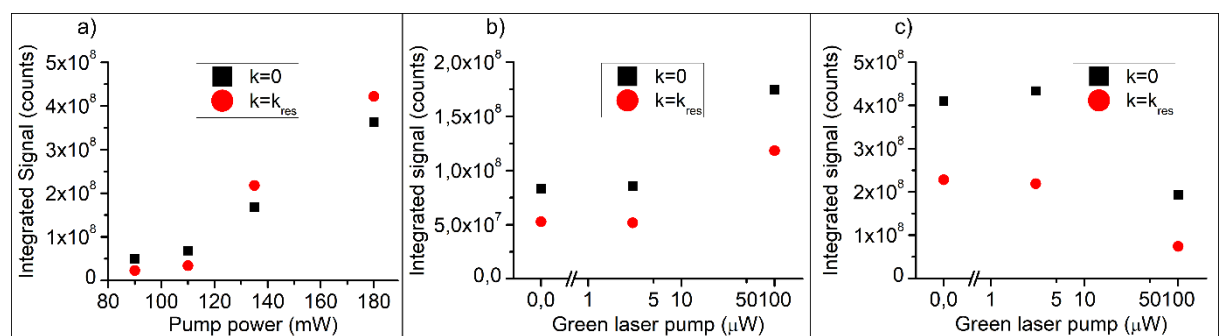


Рис.1.(а)-интенсивность сигнала пропускания в зависимости от мощности накачки, суммированная вблизи $k = 0$ (чёрные квадраты) и во всех точках вида $(\pm k_{\text{res}}; 0)$ и $(0; \pm k_{\text{res}})$ (красные круги). (б) и (с)-интенсивность сигнала пропускания лазера накачки в зависимости от мощности подсветки зелёным лазером ниже порога (б) и выше порога (с) с теми же обозначениями.

Литература

[1] Gavrilov S.S., Phys. Rev. B, 103, 184304 (2021).

Согласованная поглощающая нагрузка

А.А.Титенко*

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

**e-mail: toliatitenko@gmail.com*

Дальнейшее развитие СВЧ-электроники во многом зависит от наличия соответствующей элементной базы. Одним из стандартных узлов современной аппаратуры СВЧ-диапазона, обеспечивающих, в частности, функционирование таких устройств, как диодные преобразователи частоты, измерительные мосты, направленные ответвители, сумматоры, измерители мощности, и т. д., являются согласованные нагрузки.

Наиболее перспективными для практического применения являются согласованные поглощающие нагрузки изготовленные из ферроэпоксида, состоящего из модифицированного порошка карбонильного железа, реологических добавок и эпоксидной смолы. Преимущества применения данного материала заключается в широкополосности (способность работать во всем диапазоне частот применяемого волновода) и низком значении КСВ (коэффициент стоячей волны) при небольших массогабаритных показателях получаемых нагрузок, а также данный материал легко поддается механической обработке, а также может отливаться в формы сложной конфигурации.

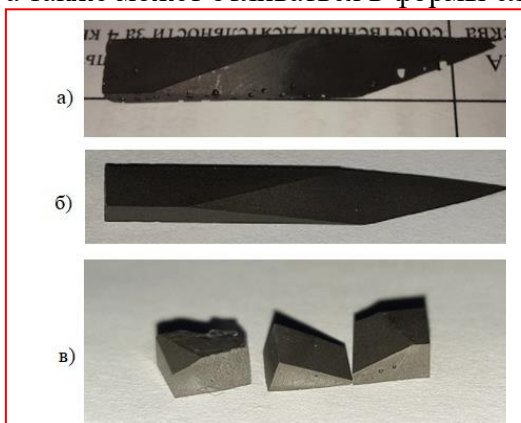


Рис. 1. Ферроэпоксидная вставка:
а) сделанная по существующим технологиям производства;
б) по предложенной методике;
в) образец, представленный под буквой «б» со сделанными «разрезами» для демонстрации внутренней структуры.

Актуальность постановки настоящей работы обусловлена тем, что на данный момент не существует единой хорошо отработанных технологий по созданию, производству и контролю согласованных поглощающих нагрузок, удовлетворяющих потребностям практики по габаритам и частотным характеристикам.

В работе кратко рассмотрены достигнутые результаты исследований, направленные на улучшение уже существующих технологий производства согласованных поглощающих нагрузок (см. рис. 1 а, б, в), а также предложена новая конструкция нагрузки (см. рис. 2).

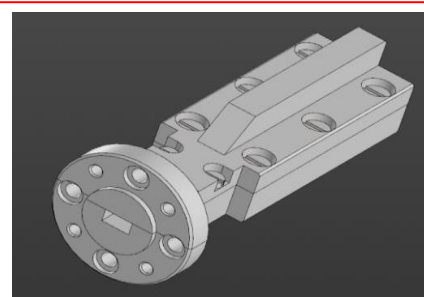


Рис. 2. 3D-модель согласованной поглощающей нагрузки.

Низкотемпературные свойства кремниевого детектора суб-терагерцового излучения

А.Р.Хисамеева, * А.В.Щепетильников, Я.В.Федотова, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин

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

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

Освоение субтерагерцового частотного диапазона породило возникновение ряда новых электронных устройств, нашедших применение не только в физике конденсированного состояния, но и в ряде прикладных отраслей, таких как: телекоммуникации, медицина, сфера безопасности, а также отрасль неразрушающего контроля качества на производстве. Широкое применение суб-ТГц детекторов обеспечивают уникальные свойства этого частотного диапазона. Они включают в себя прозрачность большинства материалов в данном диапазоне, хорошее пространственное разрешение для визуализации исследуемых объектов, а также безопасность излучения для людей и животных.

В последнее время широко проводились исследования детекторов суб-ТГц излучения на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs [1]. В данной работе осуществлен анализ характеристик концептуально идентичного детектора на основе кремния. Преимущества устройств на основе кремния включают в себя простоту реализации, возможность использовать современные фабричные технологии, специализированные под кремниевые устройства, а также низкую себестоимость в сравнении с аналогичными устройствами на основе GaAs.

В рамках данной работы были исследованы температурные зависимости чувствительности и шумового эквивалента мощности плазмонных суб-ТГц детекторов в диапазоне температур от 77 до 300 К. Было установлено, что максимум чувствительности детектора находится в диапазоне частот 96–100 ГГц и достигает максимального значения в $25 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Анализ температурных зависимостей демонстрирует, что при понижении температуры до азотной происходит увеличение чувствительности детектора в 10 раз. Шумовые характеристики, полученные в предположении шума Найквиста, также улучшились с $2 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ при понижении температуры. Помимо этого были изучены зависимости дифференциального сопротивления детектора и его чувствительности от постоянного напряжения, приложенного на выход детектора. При температуре 77 К обе зависимости перестают быть монотонными и приобретают особенность при нулевом внешнем напряжении.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект No 19-72-30003).

Литература

[1] Muravev V.M., Kukushkin I.V., Appl. Phys. Lett. 2012.V. 100. No. 8. Art. No. 082102.

Плазменные возбуждения в SiGe/Si квантовых ямах

**А.Р.Хисамеева^{1*} А.В.Щепетильников,¹ С.А.Лопатина,^{1,2} Г.А.Николаев,¹
Я.В.Федотова,¹ И.В.Кукушкин¹**

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

²*НИУ «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 11*

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

В рамках данной работы были подробно исследованы свойства плазменных возбуждений в высококачественных двумерных системах, формирующихся в SiGe/Si квантовых ямах. Такие полупроводниковые гетероструктуры имеют целый ряд уникальных характеристик, в том числе и с точки зрения использования таких структур как основы для детекторов субтерагерцового излучения. В первую очередь, такие структуры характеризуются высокой чистотой и качеством, так, низкотемпературная подвижность в них достигает значений 2×10^6 cm^2/Vs , а транспортные времена рассеяния сравнимы с временами рассеяния в GaAs гетероструктурах. С другой стороны, SiGe/Si структуры полностью совместимы со стандартными кремниевыми технологиями, что в перспективе обеспечит низкую себестоимость детекторов и возможность крупносерийного производства.

С фундаментальной точки зрения, в таких гетероструктурах эффективная масса носителей заряда достаточно велика, что обеспечивает доминирование характерной энергии электрон-электронного взаимодействия над кинетической энергией. В таких условиях электрон-электронные корреляции существенно модифицируют основные свойства такой материальной системы [1]. Таким образом, изучение спектра плазменных колебаний в SiGe/Si полупроводниковых гетероструктурах представляет собой крайне важную задачу.

В настоящей работе впервые был подробно исследован спектр магнитоплазменных возбуждений в структуре, не имеющей слоя дополнительного легирования. При этом двумерная электронная система в яме формировалась при приложении напряжения к верхнему затвору. методика напыления частично прозрачного для СВЧ излучения затвора в частотном диапазоне 50-500 ГГц из хрома на поверхности слоя диэлектрика. В таких системах подвижность электронов увеличивается более чем на порядок и достигает рекордных значений. Были получены значения эффективной массы для серии концентраций, а также значения транспортных времён релаксации. Для сравнения в работе также приведены результаты идентичных измерений на легированных структурах SiGe/Si.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект No 22-72-00135).

Литература

[1] M. Yu. Melnikov, A. A. Shashkin, V. T. Dolgoplov, Amy Y. X. Zhu, S. V. Kravchenko, S.-H. Huang, and C. W. Liu, Phys. Rev. B 99, 081106(R) (2019).

ISBN 978-5-6045956-3-3

