

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

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

Российский научный фонд (РНФ)

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

Сборник тезисов



***10-11 июня 2020 года
г. Черноголовка, Московская обл.***

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

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

Российский научный фонд (РНФ)

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

Сборник тезисов

***10-11 июня 2020 года
г. Черноголовка, Московская обл.***

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

10-11 июня 2020 года

г. Черноголовка, Московская обл.

Программный комитет:

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

Организационный комитет:

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

ISBN 978-5-6040418-6-4



ISBN: 978-5-6040418-6-4

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИГЛАШЁННЫЕ ДОКЛАДЫ

<u>В.М.Муравьев</u>, П.А.Гусихин, И.В.Андреев, С.И.Губарев, И.В.Кукушкин. Новое семейство плазменных возбуждений в двумерной электронной системе	6
<u>В.А.Волков</u>, А.А.Заболотных. Двумерные экранированные магнитоплазмон-поляритоны	7
<u>А.А.Заболотных</u>, В.А.Волков. Плазмоны в двухслойной электронной системе с одним ограниченным слоем	8
<u>И.В.Загороднев</u>, Д.А.Родионов, А.А.Заболотных, В.А.Волков. Плазменные моды больших дисков из двумерного электронного газа	9
<u>С.И.Дорожкин</u>, А.А.Капустин. Интенсивность поглощения микроволнового излучения двумерными электронными системами, обусловленного возбуждением магнитоплазмонов	10
<u>А.В.Щепетильников</u>, А.Р.Хисамеева, Ю.А.Нефёдов. Бесконтактное измерение индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления.....	11
<u>А.В.Щепетильников</u>, <u>П.А.Гусихин</u>, В.М.Муравьев, Г.Э.Цыдынжапов, Ю.А.Нефёдов, А.А.Дрёмин. Ультрабыстрый суб-ТГц линейный сканер для досмотра почтовых отправок	12
<u>В.И.Кукушкин</u>, Е.Г.Завьялова, О.А.Амбарцумян, Д.А.Грибанев. Экспресс-тест для детектирования вируса гриппа на основе SERS-биосенсора	13
<u>Д.А.Грибанев</u>, В.И.Кукушкин, Е.Г.Завьялова. Детектирование вируса гриппа А с помощью коллоидных серебряных наночастиц, модифицированных аптамерами к гемагглютиниру	14
<u>Я.В.Федотова</u>, В.И.Кукушкин, В.В.Соловьёв, И.В.Кукушкин. Поверхностное усиление сигнала рамановского рассеяния света при инфракрасном возбуждении	15
<u>М.Н.Ханнанов</u>, В.Е.Кирпичев. Экспресс-анализ природного газа и газовых смесей с помощью портативного КР спектрометра, соединенного с полым фотонно-кристаллическим световодом	16
<u>А.В.Горбунов</u>, А.С.Журавлев, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев. Термализация триплетных магнитоэкситонов	17
<u>В.Д.Кулаковский</u>, А.А.Деменев и С.С.Гаврилов. Динамика и когерентные свойства экситон-поляритонных систем, резонансно возбуждаемых в GaAs микрорезонаторах	18
<u>Л.В.Кулик</u>, А.С.Журавлев. Спиновое локально несжимаемое состояние ДКЭХ 3/2... ..	19
<u>А.Б.Ваньков</u>. Кулоновские корреляции как первопричина ферромагнитного перехода в режиме квантового эффекта Холла с $\nu=2$	20
<u>А.В.Ларионов</u>, Л.В.Кулик. Изучение частично поляризованной по спину двумерной электронной системы методом время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра	21
<u>В.В.Соловьёв</u>, И.В.Кукушкин. Гетероструктуры GaN/AlGaN: новые фундаментальные свойства и их практические приложения	22
<u>А.А.Максимов</u>, Е.В.Филатов, И.И.Тартаковский. Инжекционный полупроводниковый лазер с циркулярно-поляризованным излучением	23
<u>А.С.Бричкин</u>, Ф.А.Бенимецкий, Е.А.Хестанова. Исследование поляритонов в монослоях MoSe ₂ в одномерном фотонном кристалле	24
<u>А.А.Деменев</u>. Когерентные осцилляции в экситон-поляритонной системе в режиме джозефсоновского перехода при импульсной широкоапертурной резонансной оптической накачке	25

<u>А.В.Черненко.</u> Новый метод создания высококачественных многослойных структур на основе дихалькогенидов переходных металлов	26
---	----

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

<u>И.В.Андреев, Н.Д.Семенов, В.М.Муравьев.</u> Эффекты запаздывания в спектре экранированных двумерных плазмонов.....	27
<u>И.В.Андреев, Н.Д.Семенов, В.М.Муравьев.</u> Время релаксации циклотронного резонанса в двумерной электронной системе.....	28
<u>В.Е.Бисти.</u> Люминесценция двумерного электронного газа низкой плотности: Вигнеровский кристалл или экситон Махана?	29
<u>А.Б.Ваньков.</u> Межподзонный плазмон как детектор спиновой поляризации в двумерной электронной системе на основе $MgZnO / ZnO$	30
<u>А.В.Горбунов, А.С.Журавлев, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев.</u> Быстрый спиновый транспорт в холловском диэлектрике.....	31
<u>П.А.Гусихин, А.М.Зарезин, А.А.Дремин, В.М.Муравьев.</u> Спектр двумерных «прокси» плазмонов	32
<u>П.А.Гусихин, А.М.Зарезин, А.А.Заболотных, В.А.Волков, В.М.Муравьев.</u> Физическая природа двумерных релятивистских плазмонов	33
<u>П.А.Гусихин, А.М.Зарезин, А.А.Фортунатов, В.М.Муравьев.</u> Двумерные «прокси» плазмоны в диске и кольце.....	34
<u>П.А.Гусихин, А.А.Фортунатов, В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин.</u> Использование двумерных фотонных кристаллов для спектроскопии в субтерагерцовом частотном диапазоне.....	35
<u>А.А.Деменев.</u> Акустооптические переключения поляризации экситон-поляритонной системы в полупроводниковых микрорезонаторах	36
<u>А.С.Журавлев, Л.В.Кулик.</u> Спиновая релаксация в холловском ферромагнетике.....	37
<u>А.С.Журавлев.</u> Время-разрешённое керровское вращение, как метод исследования спиновых коллективных состояний в 2ДЭС.....	38
<u>В.М.Муравьев, П.А.Гусихин, А.М.Зарезин, И.В.Кукушкин.</u> Экспериментальное исследование влияния граничных условий на поведение одномерных плазменных возбуждений в полосках двумерных электронов.....	39
<u>В.М.Муравьев, П.А.Гусихин, А.М.Зарезин, И.В.Кукушкин.</u> Терагерцовое и субтерагерцовое смешивание на основе нелинейного плазмонного отклика полоски двумерных электронов с неоднородностью	40
<u>Б.Д.Кайсин.</u> Формирование ферромагнитной фазы при четных факторах заполнения в сильновзаимодействующих ДЭС на основе ZnO	41
<u>Б.Д.Кайсин.</u> Спиновая деполяризация холловского ферромагнетика вблизи $\nu = 1$ в ДЭС на основе ZnO	42
<u>В.Е.Кирпичев, М.Н.Ханнанов.</u> Портативный газоанализатор на основе волоконно-усиленного рамановского рассеяния	43
<u>А.В.Ларионов, Л.В.Кулик.</u> Особенности когерентной спиновой динамики двумерного электронного газа в режиме Холловского ферромагнетика	44
<u>М.В.Лебедев, А.Л.Парахонский, А.В.Соловьев, О.В.Мисочко, А.И.Овян, Г.Б.Лесовик.</u> Квантовые генераторы случайных чисел на основе процесса фотодетектирования: влияние внешних параметров и поиск динамических закономерностей.....	45
<u>А.А.Максимов, И.И.Тартаковский, Е.В.Филатов.</u> Модель спин-решеточной релаксации в полумагнитных A^2B^6 полупроводниках	46
<u>О.В.Мисочко.</u> Нетермическое смягчение частоты когерентных фононов в кристаллах с пайерлсовскими искажениями	47

<u>А.Л.Парахонский, М.В.Лебедев, А.А.Дремин, В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин.</u>	
Влияние контактных и краевых областей электронной 2D-системы на гигантские оптические флуктуации в режиме квантового эффекта Холла.....	48
<u>Н.Д.Семенов, И.В.Андреев, В.М.Муравьев.</u>	
Создание LC-контура на основе двумерных электронных систем	49
<u>Н.Д.Семенов, Г.Э.Цыдынжапов, В.М.Муравьев.</u>	
О быстродействии терагерцовых плазмонных детекторов	50
<u>Э.Степанец-Хуссейн, А.В.Ларионов, С.В.Егоров.</u>	
Манипулирование спиновой когерентностью двумерных электронов в GaAs квантовой яме с помощью одномерной латеральной локализации	51
<u>С.Н.Терешко, А.А.Деменев, А.А.Колосветов.</u>	
Термализация экситонных поляритонов, резонансно возбуждаемых в GaAs микрорезонаторах	52
<u>В.И.Кукушкин, Е.Н.Морозова, В.В.Соловьев, Я.В.Федотова, И.В.Кукушкин.</u>	
Зависимость коэффициента усиления SERS от геометрических параметров подложки при инфракрасном возбуждении.....	53
<u>А.А.Максимов, И.И.Тартаковский, С.В.Зайцев, Е.В.Филатов.</u>	
Зависимость от температуры времен релаксации фотовозбужденных дырок в гетероструктурах 2-го типа ZnSe/BeTe	54
<u>А.Р.Хисамеева, А.В.Щепетильников, В.М.Муравьев, Ю.А.Нефёдов.</u>	
Контролируемое заполнение долин в узких квантовых ямах AlAs	55
<u>А.Р.Хисамеева, А.В.Щепетильников, В.М.Муравьев, Ю.А.Нефёдов.</u>	
Перестройка энергетического спектра электронов в узких квантовых ямах AlAs	56
<u>А.В.Щепетильников, А.Р.Хисамеева, В.В.Соловьев, Ю.А.Нефёдов.</u>	
Исследование электронного парамагнитного резонанса в гетеропереходах GaN/AlGaN	57
<u>А.В.Щепетильников, А.М.Зарезин, В.М.Муравьев, П.А.Гусихин.</u>	
Анализ содержания влаги в листьях растений.....	58
<u>Э.Степанец-Хуссейн, В.Е.Кирпичёв, S.Athavale, M.Gershburg.</u>	
Новый портативный раман-люминесцентный комплекс для геммологической диагностики алмазов и бриллиантов в ювелирных изделиях	59

Новое семейство плазменных возбуждений в двумерной электронной системе

В.М.Муравьев*, П.А.Гусихин, И.В.Андреев, С.И.Губарев, И.В.Кукушкин

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

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

Центральным вопросом физики низкоразмерных электронных систем является изучение одночастичных и коллективных элементарных возбуждений системы. Одним из типов коллективных возбуждений двумерной электронной системы (ДЭС) является волна зарядовой плотности – плазмон. Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах интенсивно изучаются уже более полувека. Отчасти такой интерес связан с множеством уникальных свойств, отличающих двумерные плазмоны от их трехмерных аналогов.

Во-первых, спектр двумерных плазмонов имеет бесщелевой корневой характер, что вызвано особенностью кулоновского взаимодействия в двумерных системах. При этом, в отличие от плазменных волн в трехмерных материалах, скорость двумерных плазмонов регулируется в широких пределах путем изменения электронной концентрации или приложения внешнего магнитного поля. Во-вторых, заряды в двумерном слое не способны эффективно экранировать трехмерное поле падающей на ДЭС электромагнитной волны. Это приводит к сильной гибридизации света с двумерной плазмой и образованию новых элементарных возбуждений – плазмонных поляритонов. В-третьих, на свойства плазмонов оказывает значительное влияние окружение ДЭС. Это вызвано тем, что двумерные системы в большинстве случаев образуются на гетероинтерфейсе, который располагается вблизи поверхности полупроводниковой подложки. Например, наличие металла на поверхности подложки существенно изменяет спектр двумерных плазменных волн, а также приводит к возбуждению дополнительного семейства плазменных колебаний – релятивистского и «прокси» плазмонов [1,2].

В настоящей работе установлено, что плазменные волны данного семейства обладают целым рядом новых физических свойств. Главным из которых является то, что при измерениях на одной и той же структуре гибридизация релятивистских и «прокси» плазмонов со светом многократно превосходит гибридизацию обычных двумерных плазмонов. Данное свойство позволяет наблюдать на AlGaAs/GaAs гетероструктурах стандартного качества ($\mu=5000$ см²/Вс при T=300 K) резонансный отклик от релятивистских плазмонов вплоть до комнатной температуры на частоте $f > 1$ ГГц. Последнее обстоятельство представляет значительный интерес для создания новой элементной базы терагерцовой электроники.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-72-10072).

Литература

- [1] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, I.V. Andreev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 114, 106805 (2015).
- [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406 (R) (2019).

Двумерные экранированные магнитоплазмон-поляритоны

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

Плазмоны в 2D электронных системах важны в прикладном отношении и исследуются уже полвека. Начнём с их классификации. С теоретической точки зрения базовыми являются плазмоны в двух латерально безграницных системах: обычные (неэкранированные) плазмоны (в системах типа квантовых ям и селективно легированных гетероструктур) и экранированные (электронами затвора) плазмоны (в системах типа структур металл-диэлектрик-полупроводник). При учете электромагнитного запаздывания межэлектронного взаимодействия плазмоны могут сильно взаимодействовать со светом, превращаясь в плазмон-поляритоны. В нормальном магнитном поле принято различать неэкранированные и экранированные магнитоплазмоны и магнитоплазмон-поляритоны. В рамках этой классификации существуют 8 типов 2D плазмонов, свойства 7-ми из которых сравнительно хорошо исследованы как теоретически, так и экспериментально. Настоящая работа посвящена построению теории 8-го типа 2D плазмонов – экранированных магнитоплазмон-поляритонов (ЭМПП), мало исследованных к настоящему времени.

Спектр ЭМПП определяется довольно громоздким дисперсионным уравнением, которое в литературе до сих пор детально не исследовалось. Отсутствие интереса, возможно, связано с теоремой Кона, которая запрещает влияние многоэлектронных эффектов на частоту одночастичного циклотронного резонанса и, можно ожидать, на щель в спектре магнитоплазмонов. Возможно также, что пассивность теоретиков связана с кажущейся неактуальностью задачи в силу малости скорости экранированного плазмона V по сравнению со скоростью света C в стандартных экспериментальных образцах.

В работе удалось аналитически решить эту задачу и найти спектр ЭМПП. Кроме того, вычислено резонансное поглощение при нормальном падении света и установлена связь частоты циклотронного резонанса со спектром ЭМПП.

Показано, что

- 1) щель в спектре ЭМПП сильно зависит (уменьшается) в релятивистском пределе, когда параметр V^2/C^2 не является малым,
- 2) циклотронный пик в поглощении света определяется щелью в спектре ЭМПП, поэтому частотой циклотронного резонанса можно эффективно управлять с помощью напряжения на затворе,
- 3) существенная зависимость частоты циклотронного резонанса от концентрации электронов является редким примером гигантского (в релятивистском пределе) нарушения теоремы Кона, которая неприменима при учете запаздывания межэлектронного взаимодействия.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-02-00817.

Плазмоны в двухслойной электронной системе с одним ограниченным слоем

А.А.Заболотных*, В.А.Волков

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

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

Плазменные колебания (плазмоны) в 2D электронных системах (ЭС) исследуются как теоретически, так и экспериментально уже несколько десятков лет. Обычно плазмоны рассматривают в двух базовых системах: неэкранированная бесконечная 2D ЭС [1], и экранированная 2D ЭС, т.е. когда вблизи 2D ЭС находится бесконечный идеально проводящий затвор [2]. Недавно были теоретически [3] и экспериментально [4] исследованы плазмоны в «гибридной» системе: 2D ЭС бесконечная, а затвор имеет вид полосы. Было получено, что в такой системе существует набор плазменных мод, локализованных около полосы и распространяющихся вдоль неё. Фундаментальная плазменная мода обладает необычным бесщелевым корневым спектром.

В данной работе результаты [3] обобщены на случай, когда проводимость затвора конечна, т.е. рассмотрена двухслойная система, в которой один слой бесконечен, второй имеет вид полосы.

Исследовалась только «разностная» по заряду мода, когда в 2D слоях наводятся заряды разных знаков и слои «экранируют» друг друга. Задача решалась в рамках классического подхода, эффектами электромагнитного запаздывания пренебрегалось. При решении использовались два, по-видимому, разумных приближения: 1) расстояние между слоями мало по сравнению с шириной полосы, длиной волны плазмона и другими характерными длинами задачи; 2) частота искомого плазмона мала по сравнению с частотой 2D плазмонов в бесконечном 2D слое вдали от полосы.

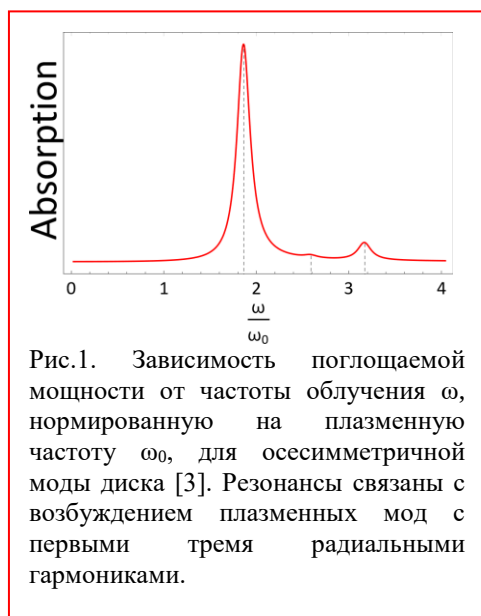
Получено, что дисперсия фундаментальной плазменной моды в длинноволновом пределе имеет линейную асимптотику, которая определяется проводимостью полосы. Если проводимость полосы становится сколь угодно большой, область применимости линейной асимптотики сжимается и в пределе идеально проводящей полосы восстанавливается корневая длинноволновая дисперсия фундаментальной моды [3]. Если систему поместить во внешнее постоянное магнитное поле, то фундаментальная мода остаётся бесщелевой, в отличие от случая идеально проводящей полосы [3], в котором в спектре этой моды появлялась частотная щель, равная циклотронной частоте электронов в бесконечной 2D ЭС.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ 16-12-10411.

Литература

- [1] F. Stern, Phys. Rev. Lett. 18, 546 (1967).
- [2] А.В. Чаплик, ЖЭТФ, 62, 746 (1972).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).
- [4] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406(R) (2019)

Плазменные моды больших дисков из двумерного электронного газа

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: igor.zagorodnev@gmail.com*

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.1. Для проводимости системы использована модель Друде. В случае слабого электромагнитного запаздывания найдены аналитические выражения для положения и ширин 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.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ 16-12-10411.

Литература

- [1] I.V. Kukushkin et al., Phys. Rev. Lett. 90, 156801 (2003).
- [2] P.A. Gusikhin et al., Phys. Rev. Lett. 121, 176804 (2018).
- [3] I.V. Zagorodnev et al., Semiconductors 53, 1873 (2019).

Интенсивность поглощения микроволнового излучения двумерными электронными системами, обусловленного возбуждением магнетоплазмонов

С.И.Дорожкин*, А.А.Капустин

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

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

Проанализирована связь микроволнового поглощения двумерной электронной системой (ДЭС) со спектром магнетоплазмонов.

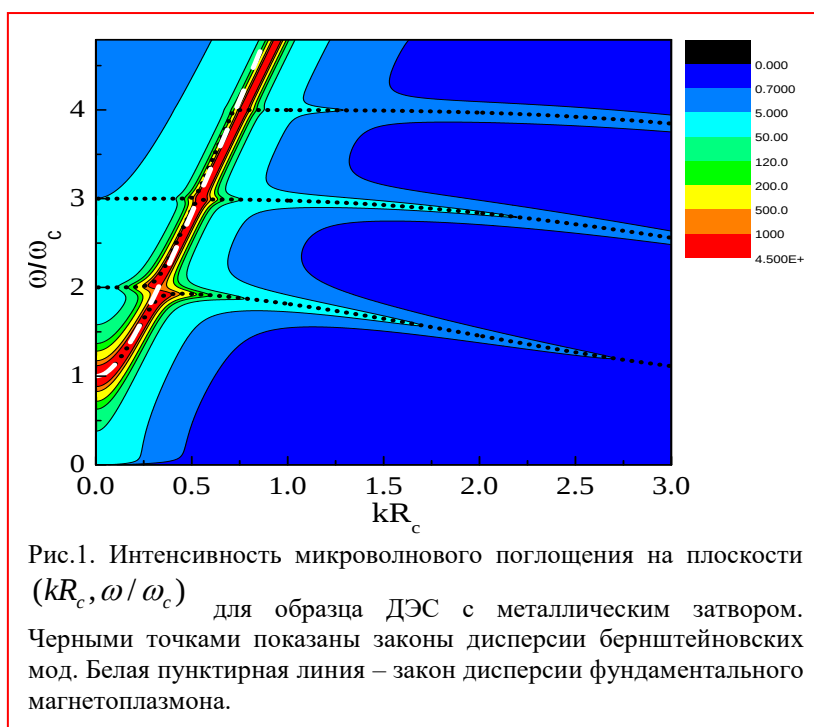


Рис.1. Интенсивность микроволнового поглощения на плоскости $(kR_c, \omega/\omega_c)$ для образца ДЭС с металлическим затвором. Черными точками показаны законы дисперсии бернштейновских мод. Белая пунктирная линия – закон дисперсии фундаментального магнетоплазмона.

с спектром магнетоплазмонов.

Поглощение волны с электрическим полем, изменяющимся вдоль плоскости ДЭС по закону $E = E_0 \exp(kx - \omega t)$

вычислено численно с использованием квазиклассических результатов, полученных в работе [1] в пренебрежении

эффектами запаздывания. Пример такого расчета для ДЭС с затвором показан на рис. 1. Здесь R_c – циклотронный радиус

электронов на уровне

Ферми, ω_c – циклотронная частота. Там же показан спектр бернштейновских мод, вычисленный на основании уравнения, приведенного в работе [2], и закон дисперсии фундаментального магнетоплазмона (белый пунктир), обеспечивающего основные особенности в поглощении (красная полоса). Показано, что в пределе $\omega\tau \gg 1$ максимумы поглощения на плоскости $(kR_c, \omega/\omega_c)$, определяемые из уравнений работы [1], соответствуют закону дисперсии бернштейновских мод, и этот результат справедлив для ДЭС с затвором (см. рис. 1) и без него. Расчеты демонстрируют существование минимумов поглощения, обусловленного фундаментальным магнетоплазмонном, на гармониках циклотронного резонанса ($\omega/\omega_c = 2, 3, \dots$). В шкале интенсивности поглощения на рис. 1 эти минимумы не разрешаются. Рассмотрена возможность объяснения этим эффектом наблюдавшихся экспериментально [2] минимумов магнетопоглощения.

Литература

- [1] A.V. Chaplik and D. Heitmann, J. Phys. C: Solid State Phys. 18, 32357 (1985).
- [2] С.И. Дорожкин, А.А. Капустин, Письма в ЖЭТФ 101, 101 (2015).

Бесконтактное измерение индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления

А.В.Щепетильников^{*}, А.Р.Хисамеева, Ю.А.Нефёдов

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

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

Индукцированные микроволновым излучением осцилляции магнетосопротивления двумерной электронной системы являются объектом активного изучения последние двадцать лет. Несмотря на значительные усилия мирового научного сообщества полного понимания данного эффекта ещё не достигнуто, а значит, изучение данного феномена представляет большой фундаментальный интерес.

В рамках данной работы высокочастотная проводимость двумерного электронного газа, сформированного в ZnO/MgZnO гетеропереходах, была изучена в частотном диапазоне от 4 до 18 ГГц как в малых магнитных полях, так и в режиме квантового эффекта Холла. Проводимость измерялась по пропусканию широкополосного копланарного волновода, нанесённого непосредственно на поверхность образца. Было показано, что при облучении образца дополнительным возбуждающим излучением с частотой в диапазоне от 60 до 140 ГГц высокочастотная проводимость демонстрировала хорошо разрешимые осцилляции (см. рисунок 1). Данные осцилляции наблюдались во всём частотном диапазоне опорного сигнала вплоть до 18 ГГц. Характерная частота, при которой начинается затухание осцилляций, соответствует характерному времени, лежащему между временем рассеяния, определяемого из ширины линии циклотронного резонанса, и временем жизни, определяемым по магнетополевому затуханию индуцированных микроволновым излучением осцилляций сопротивления

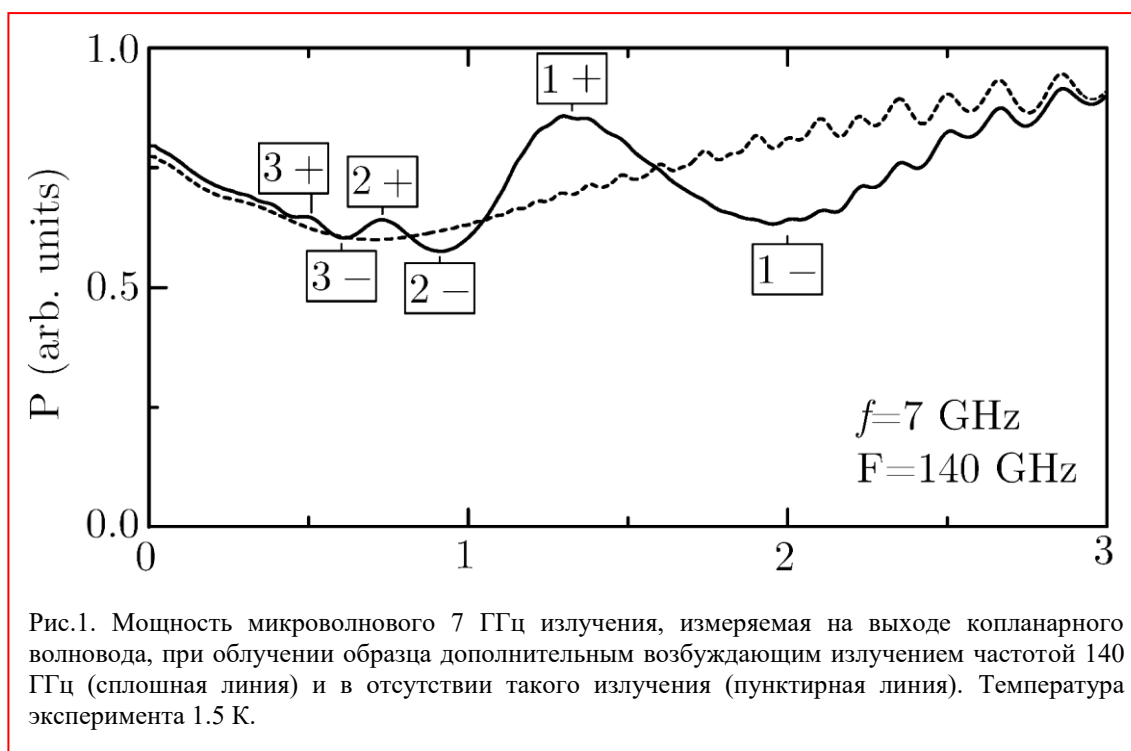


Рис.1. Мощность микроволнового 7 ГГц излучения, измеряемая на выходе копланарного волновода, при облучении образца дополнительным возбуждающим излучением частотой 140 ГГц (сплошная линия) и в отсутствии такого излучения (пунктирная линия). Температура эксперимента 1.5 К.

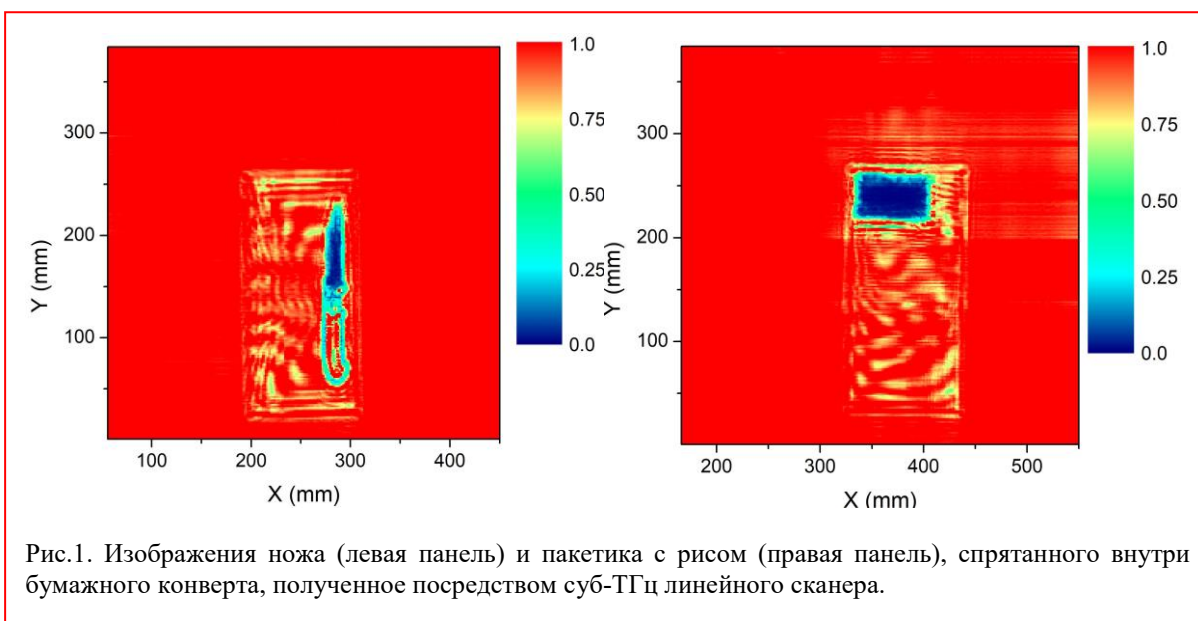
Ультрабыстрый суб-ТГц линейный сканер для досмотра почтовых отправок

**А.В.Щепетильников, П.А.Гусихин*, В.М.Муравьев, Г.Э.Цыдынжапов,
Ю.А.Нефёдов, А.А.Дрёмин**

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

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

Задача досмотра почтовых отправок на наличие запрещенных к пересылке потенциально опасных предметов, таких как холодное и огнестрельное оружие, наркотические и взрывчатые вещества, является крайне актуальной. Существующие методы её решения, использующие рентгеновское излучение, являются дорогими, относительно медленными и могут нести потенциальную опасность для оператора в силу ионизирующего характера излучения. Альтернативным подходом является использование электромагнитного излучения субтерагерцового частотного диапазона. Излучение такого типа не является ионизирующим, а значит, является безопасным как для оператора, так и для досматриваемого объекта. Более того, большинство материалов, используемых при упаковке почтовых отправок, а именно, бумага, фанера, картон, полиэтилен, являются прозрачными в данном частотном диапазоне, при этом металл, керамика и различные порошкообразные смеси эффективно отражают или рассеивают суб-ТГц излучение. Таким образом, предметы, сделанные из указанных материалов, могут быть обнаружены в почтовых отправлениях.



В рамках данной работы для решения указанной задачи был разработан ультрабыстрый линейный сканер, работающий на частоте 100 ГГц. Сканер состоит из вмонтированной в конвейер камеры, содержащей линейный массив детекторов, источника излучения на базе лавинно-пролётного диода, а также оптической системы, формирующей пучок в виде вытянутого вдоль камеры эллипса. Было показано, что разрешение системы достигает значения в 5 мм, а динамический диапазон составляет 40 dB. Работоспособность системы была продемонстрирована на реальных объектах – конвертах, содержащих нож и пакетик с рисом (см. рис. 1).

Экспресс-тест для детектирования вируса гриппа на основе SERS-биосенсора

В.И.Кукушкин^{1*}, Е.Г.Завьялова², О.А.Амбарцумян³, Д.А.Грибанев¹

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

²МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1

³Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова, 105064, г. Москва, Малый Казенный переулок, д.5а

*e-mail: kukushvi@gmail.com

Для создания биосенсоров для экспрессного и высокочувствительного выявления вируса гриппа была использована технология поверхностно-усиленного Рамановского рассеяния света (SERS). На специально разработанных наноструктурированных подложках с входным и выходным резонансами вблизи частоты лазерного возбуждения 532 нм коэффициент усиления SERS достигал 10^8 , обеспечивая превосходную чувствительность. В биосенсоре в качестве узнающих вирус гриппа элементов использовались аптамеры к поверхностному белку вируса гриппа (гемагглютнину) и они обеспечивали специфическое распознавание вируса. Для достижения высокой чувствительности детектирования вируса был собран сэндвич из первичных тио-модифицированных аптамеров, которые прикреплялись к металлической SERS-поверхности; вируса гриппа и вторичных аптамеров, меченных Рамановски-активными молекулами красителей. Предел обнаружения вируса гриппа H3N2 составил $4 \cdot 10^4$ VP/ml. Разработанные SERS-биосенсоры обеспечивали распознавание различных штаммов вируса гриппа, включая подтипы гемагглютинаина H1, H3 и H5. Время полного анализа составляло 10 минут. Данные сенсоры могут быть использованы в качестве экспресс-тестов для быстрого, надежного и дешевого выявления различных штаммов вируса гриппа.

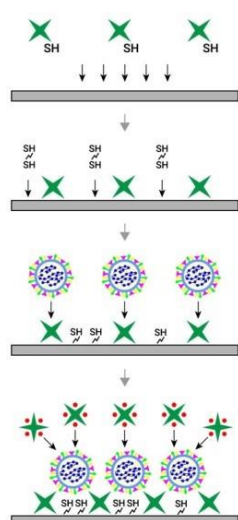


Рис.1. Схема сборки SERS-биосенсора «сэндвич» с использованием первичных тио-модифицированных аптамеров и вторичных аптамеров с SERS-меткой.

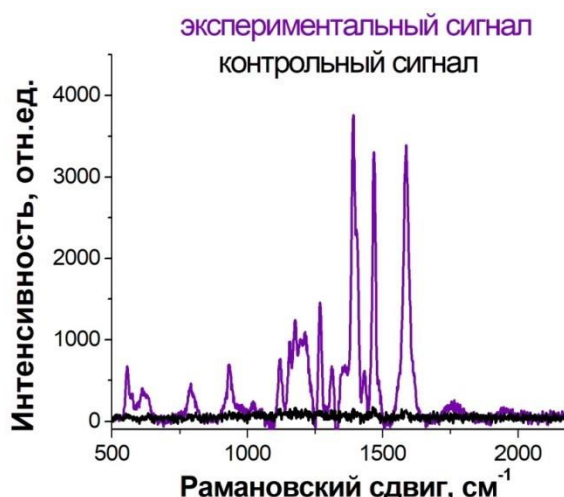


Рис. 2. SERS-спектры контрольного образца (черный цвет) и экспериментального образца (фиолетовый цвет) при концентрации вируса гриппа H3N2 $3 \cdot 10^7$ VP/ml. Спектры получены при концентрации первичных аптамеров 20 нМ и вторичных аптамеров 9 мкМ.

Детектирование вируса гриппа А с помощью коллоидных серебряных наночастиц, модифицированных аптамерами к гемагглютиниру

Д.А.Грибанев^{1*}, В.И.Кукушкин¹, Е.Г.Завьялова²

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

² МГУ имени М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1

*e-mail: digrib@gmail.com

Для быстрого и высокочувствительного выявления вируса гриппа А был использован принцип усиления Рамановского рассеяния света (SERS) на агрегатах серебряных наночастиц. Борогидрид-/цитрат-восстановленные серебряные наночастицы с гидродинамическим радиусом 20-30 нм стабилизировались тиомодифицированным аптамером, специфичным к гемагглютинином различных штаммов гриппа А. Полученные наночастицы смешивались с нетиомодифицированным аналогом, содержащим метку BDPFL. В физиологическом растворе (при концентрации NaCl – 140-160 мМ) стабилизированные аптамерами наночастицы мгновенно образуют агрегаты вокруг молекул аптамера, меченного BDPFL, вследствие чего в их спектре чётко проявляются Рамановские линии красителя. При добавлении к полученным коллоидным системам всё большей концентрации вируса происходит снижение интенсивности Рамановского сигнала красителя за счёт эффекта разрушения агрегатов серебряных наночастиц частицами вируса. При этом в случае увеличения концентрации вирусных частиц гриппа А наблюдается плавное снижение интенсивности SERS сигнала красителя (Рис. 1), а в случае частиц гриппа В и контрольной аллантоисной жидкости исчезновение сигнала SERS происходит уже при очень малых их концентрациях (Рис. 2). Разработанная SERS-система позволяет селективно дифференцировать штаммы вируса гриппа А от штаммов вируса гриппа В и от биологических жидкостей, не содержащих вирус гриппа А. Время разрушения агрегатов коллоидного серебра вирусными частицами составляет 5-7 минут, поэтому данные системы могут быть использованы в качестве экспресс-тестов для быстрого и селективного выявления различных штаммов вируса гриппа А.

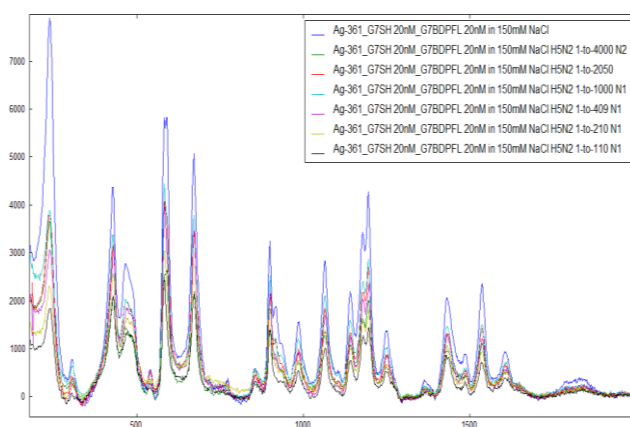


Рис. 1. Измерение SERS-спектров BDPFL образца с вирусом гриппа А (H5N2) при увеличении концентрации вируса.

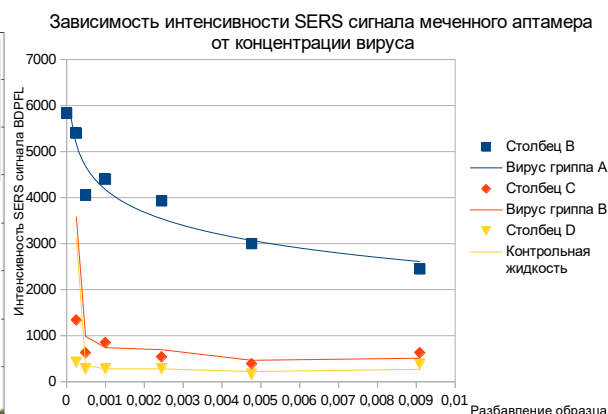


Рис. 2. Зависимости изменения интенсивности SERS-сигнала при $\nu=590 \text{ см}^{-1}$ от концентрации вируса гриппа А (H5N2), В (Victoria-87) и аллантоисной жидкости.

Поверхностное усиление сигнала рамановского рассеяния света при инфракрасном возбуждении

Я.В.Федотова,* В.И.Кукушкин, В.В.Соловьёв, И.В.Кукушкин

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

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

Рамановская спектроскопия давно и успешно используется как для исследования физических явлений в конденсированных объёмных веществах, так и для их характеристики. Типичные длины волн лазерного возбуждения, используемые в методике поверхностно усиленного рамановского рассеяния (SERS), лежат в диапазоне 450-750 нм, поскольку интенсивность рамановского рассеяния пропорциональна четвёртой степени частоты возбуждения ($\omega \sim \lambda^{-1}$). Однако в этой области длин волн возбуждения имеются проблемы, связанные с сильной фоновой люминесценцией, деградацией исследуемых органических молекул, значительным затуханием плазменных волн, вызванных падением параметра добротности практически во всех металлах [1]. Решением может послужить использование длинноволнового инфракрасного возбуждения.

В данной работе показаны результаты исследований модулированных диэлектрических и металлических структур, обеспечивающих усиление SERS-сигнала при $\lambda=1064$ нм. Установлено, что гигантское усиление неупругого рассеяния света уже наблюдается на подложках с неоптимизированной геометрией (рис. 1) [2]. Показано, что при оптимизации геометрических параметров структуры удаётся достигнуть рекордного коэффициента усиления $2 \cdot 10^8$ (рис. 2) [2]. Изученные структуры можно изготовить с применением относительно дешёвой методики фотолитографии. Уникальные свойства реализованных подложек открывают огромные перспективы по их использованию для детектирования возбудителей опасных заболеваний в биомедицинских анализах.

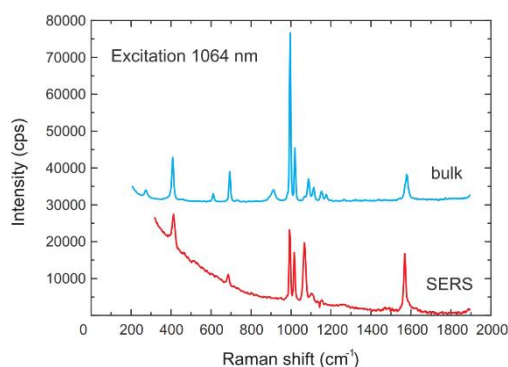


Рис. 1. Рамановские спектры тиофенола (C_6H_5S), измеренные для лазерного возбуждения с длиной волны 1064 нм в случае объёмного (сверху), жидкого тиофенола (концентрация 100%) и в случае, когда капля раствора тиофенола с концентрацией 10^{-7} высыхала на SERS-подложке (снизу).

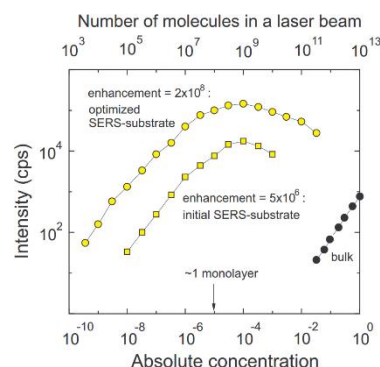


Рис. 2. Зависимости интенсивности рамановского SERS-сигнала от концентрации тиофенола, измеренные на однородных SERS-подложках большого размера (5×5 мм²) для оптимизированной и неоптимизированной подложек. На рисунке представлены эти результаты в зависимости от числа молекул тиофенола в лазерном луче.

Литература

- [1] P. B. Johnson, R. W. Christy, Physical Review B 6, 4370 (1972).
- [2] Y. V. Fedotova, V. I. Kukushkin, V. V. Solov'ev and I. V. Kukushkin, Optics Express, 27, 22(2019).

Экспресс-анализ природного газа и газовых смесей с помощью портативного КР спектрометра, соединенного с полым фотонно-кристаллическим световодом

М.Н.Ханнанов^{*}, В.Е.Кирпичев

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

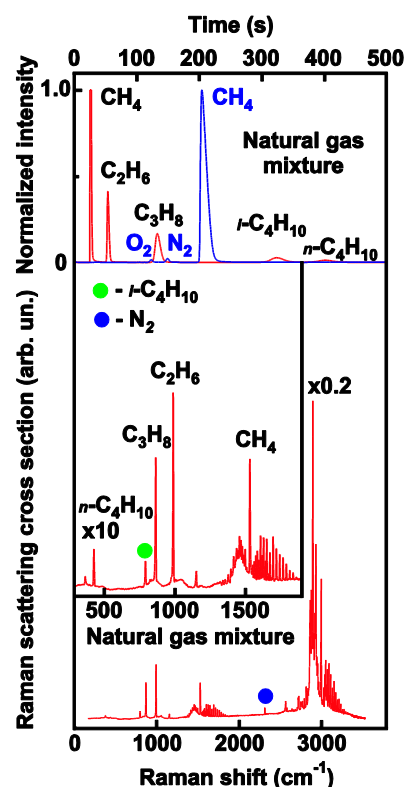
^{*}*e-mail: kmn@issp.ac.ru*

Сложная доступность газовых месторождений и транспортных газопроводов требует создания портативных переносимых экспресс-анализаторов парциального состава природного газа с точностью измерений близкой к хроматографическим методам, способных выполнять анализ in-situ широкой номенклатуры газов, в том числе и тех, которые не активны в ИК-спектроскопии (водород, кислород, азот, хлор). Нами разработан метод газового экспресс-анализа, удовлетворяющий всем необходимым требованиям для определения парциального состава природного газа и производных газовых смесей, использующий портативный Рамановский спектрометр с длиной волны возбуждения 532 нм, жестко соединенный с Hollow Core Photonic Crystal Fiber и оснащенный системой напуска газа.

Вопрос экспресс-анализа газовых смесей, включающих природный газ, попутный нефтяной газ, а также газовые фракции, получаемые при переработке и разделении природного газа, является одной из важнейших задач мировой энергетической безопасности, особенно в приложении к развитию «зеленой энергетики». Мониторинг состава многокомпонентных газовых смесей крайне важен для метрологического обеспечения хозяйственной деятельности производителей, переработчиков и потребителей природного газа и попутного нефтяного газа.

На рисунке представлены конечные результаты анализа калиброванной газовой смеси, максимально приближенной к природному газу [1]. Исследования с помощью газовой хроматографии и независимые расчеты по спектрам рамановского рассеяния дают очень близкие результаты, представленные в таблице

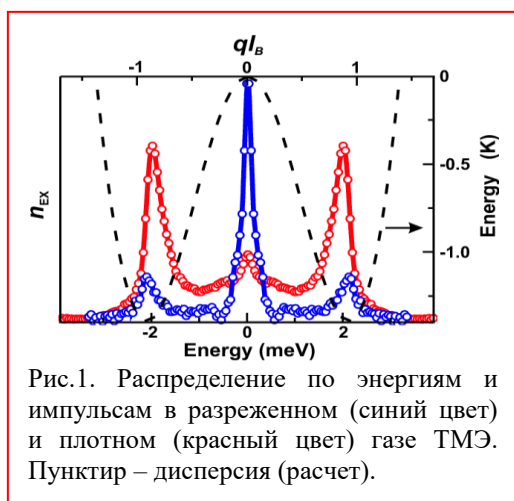
Method/Source	Component concentration in mixture, mol%				
	Methane	Ethane	Propane	n-Butane	i-Butane
Certificate of manufacturer	Rest	12.26±0.25	7.42±0.22	0.50±0.05	0.92±0.04
Gas chromatography	Rest	12.38±0.33	7.57±0.26	0.48±0.04	0.95±0.08
Raman Spectroscopy	Rest	12.70±0.80	7.20±0.40	0.53±0.09	0.88±0.10



Литература

[1] M. Khannanov et al., Applied Spectroscopy (2020).

Термализация триплетных магнитоэкситонов

А.В.Горбунов,* А.С.Журавлев, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: gorbunov@issp.ac.ru*

Триплетные магнитоэкситоны (ТМЭ) в холловском изоляторе при электронном факторе заполнения $\nu = 2$ являются композитными бозонами со спином 1. При достаточно низких температурах, $T < 1$ К, и высоких концентрациях ТМЭ, $n_{\text{ex}} \sim (1-10)\%$ от плотности квантов магнитного потока, в холловском изоляторе образуется качественно новая фаза – магнетофермионный конденсат [1]. Это состояние является первым экспериментальным примером конденсации композитных бозонов не в обычном пространстве, как в случае электрон-дырочной жидкости в объемных полупроводниках [2], и

не в импульсном пространстве, как в случае атомных бозе-конденсатов [3], а в пространстве обобщенных импульсов – величин, зависящих как от пространственных координат, так и от их градиентов [4]. Конденсат может «растекаться» из области фотовозбуждения в «объем» холловского изолятора на макроскопические расстояния. Прямые эксперименты показывают, что транспортная длина ТМЭ в конденсированном состоянии увеличивается, по крайней мере, на три порядка величины по сравнению с длиной диффузии магнитоэкситонов в газовой фазе [5].

Из-за невозможности одновременно удовлетворить условиям сохранения энергии и импульса в разреженном газе триплетных магнитоэкситонов не происходит полной термализации. Только по достижении некоторой критической экситонной плотности релаксация в нижайшее энергетическое состояние становится возможной за счет экситон-экситонного рассеяния. Вследствие сверхдлинных времен термализации (вплоть до 1 мс) ансамбль ТМЭ является существенно неравновесным, состоящим из надконденсатных ТМЭ с обобщенными импульсами $q \approx 0$ и ТМЭ в энергетическом минимуме, с импульсами порядка обратной магнитной длины, $q \sim 1/l_B$. Показано экспериментально, что перенос магнитоэкситонной плотности на большие расстояния осуществляется не всеми ТМЭ, а только теми, импульс которых близок к обратной магнитной длине, $1/l_B \sim 10^6 \text{ см}^{-1}$, и магнетофермионный конденсат формируется именно из этих магнитоэкситонов (Рис.1).

Литература

- [1] L.V. Kulik, A.V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V.B. Timofeev, S. Dickmann, and I.V. Kukushkin, Scientific Rep. 4, 10354 (2015).
- [2] L.V. Keldysh, Contemp. Physics 27, 395 (1986).
- [3] J.R. Anglin and W. Ketterle, Nature 416, 211 (2002).
- [4] J. E. Avron, I.W. Herbst, and B. Simon, Ann. Physics 114, 431 (1978).
- [5] L.V. Kulik, V.A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A.V. Gorbunov, V.V. Solov'yev, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, and S. Schmult, Scientific Rep. 8, 10948 (2018).

Динамика и когерентные свойства экситон-поляритонных систем, резонансно возбуждаемых в GaAs микрорезонаторах

В.Д.Кулаковский*, А.А.Деменев, С.С.Гаврилов

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

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

Одной из наиболее важных характеристик бозе-эйнштейновского конденсата является его пространственная когерентность. Формирование конденсата начинается с релаксации частиц в низкоэнергетическую область, где кинетическая энергия частицы сравнима с энергией ее взаимодействия с другими частицами, далее происходит сглаживание флуктуаций плотности (формирование «квазиконденсата») и формирование «истинного конденсата» заканчивается исчезновением флуктуаций фазы. Релаксация в область низких энергий, в основном, определяется процессами вынужденного рассеяния, тогда как образование конденсата определяется межчастичными взаимодействиями. В исследованиях конденсации ультрахолодных атомов было обнаружено, что когерентность расширяется с постоянной скоростью около 0.1 мм/с.

В настоящей работе обсуждается процесс формирования конденсата в газе экситонных поляритонов - гибридных экситон-фотонных состояний - в полупроводниковом микрорезонаторе (МР) со встроенными квантовыми ямами. Бозонная статистика этих частиц и чрезвычайно легкая эффективная масса позволяют наблюдать конденсацию поляритонов при повышенных температурах.

Конденсация поляритонов на нижней поляритонной (НП) ветви широко изучалась в условиях нерезонансного межзонного возбуждения экситонов в квантовых ямах. При импульсном возбуждении конденсат поляритонов образуется через несколько десятков пикосекунд после его окончания в результате стимулированного рассеяния экситонов из экситонного резервуара на дно НП ветви, а скорость распространения когерентности достигает 1 мкм/пс. Динамика формирования конденсата и его когерентные свойства при этом в значительной мере определяются взаимодействием поляритонов с экситонным резервуаром. Поэтому в последнее время после появления высокодобротных МР возник большой интерес к исследованиям конденсации поляритонов в отсутствие экситонного резервуара.

Для реализации чисто поляритонных систем без экситонного резервуара используются резонансное импульсное возбуждение в области дна НП ветви и межзонное возбуждение по периметру потенциальной ловушки с диаметром, много большим длины диффузии экситонов, но меньшим длины диффузии поляритонов. В отсутствие экситонного резервуара формирование конденсата определяется двумя основными механизмами взаимодействия – поляритон-поляритонным и поляритон-фононным.

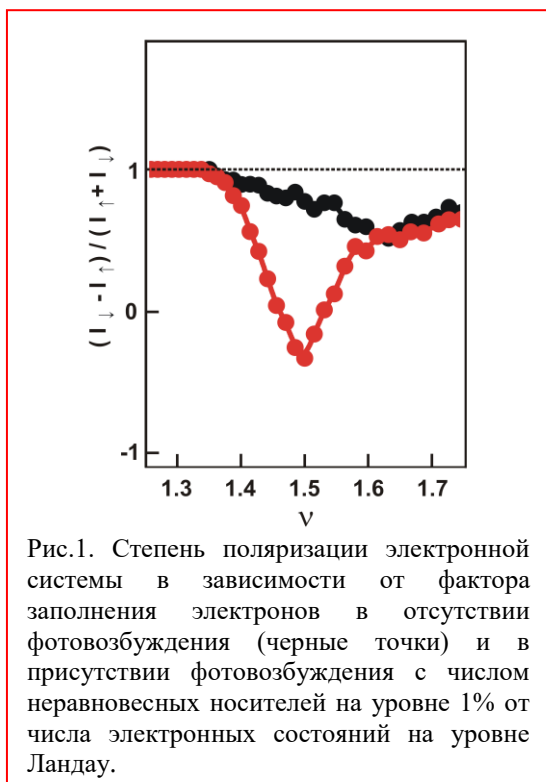
В докладе рассматривается эволюция свободно затухающих высоко когерентных и некогерентных экситон-поляритонных систем, реализующихся при резонансном возбуждении, соответственно, когерентными и некогерентными лазерными пикосекундными импульсами вблизи дна НП ветви. Детально обсуждаются (i) влияние поляритон-фононного взаимодействия на пространственную когерентность высоко когерентной поляритонной системы и (ii) влияние поляритон-поляритонного и поляритон-фононного взаимодействий на скорость релаксации поляритонов в низкоэнергетическую область и на формирование пространственной когерентности в некогерентной поляритонной системе.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Спиновое локально несжимаемое состояние ДКЭХ 3/2

Л.В.Кулик*, А.С.Журавлев*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна, д.2***e-mail: kulik@issp.ac.ru*

В течение последних нескольких лет авторами работы развивались оригинальные оптические методы создания спиновых возбуждений в двумерной электронной системе и мониторинга их релаксации в основное состояние [1]. Из информации о том, как релаксируют спиновые возбуждения, можно сделать заключения о том, как локально устроена спиновая плотность в основном состоянии [2]. В представленном докладе



обсуждаются эксперименты по релаксации спиновых возбуждений в окрестности фактора заполнения 3/2. Одним из наиболее интересных результатов является доказательство того, что фактор заполнения 3/2 является особой точкой для основного состояния двумерной электронной системы в GaAs/AlGaAs гетероструктурах, в окрестности которой ее спиновые свойства меняются кардинально. Таким образом, нарушается фундаментальная электрон-дырочная симметрия, что существенно ограничивает класс возможных волновых функций, описывающих дробное состояние 3/2, и, по-видимому, закрывает вопрос о возможности использования этого дробного состояния для построения топологического квантового компьютера. Кроме того, данный факт находится в противоречии с картиной, подтверждаемой прямыми измерениями средней по образцу спиновой поляризации (симметричной по обе стороны от фактора

заполнения 3/2), в которой 3/2 является исходной точкой для иерархии уровней Ландау композитных фермионов. Таким образом, дробное состояние 3/2 является уникальным физическим объектом, не аналогичным ни спин-поляризованному состоянию 5/2, ни частично поляризованному по спину состоянию композитных фермионов 1/2, для которого электрон-дырочная симметрия выполняется с точностью до подмешивания электронных состояний с вышележащих уровней Ландау.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. B. Timofeev, S. Dickmann, and I. V. Kukushkin, Sci. Rep. 5, 10354 (2015).
- [2] L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, V. B. Timofeev, I. V. Kukushkin, and S. Schmult, Sci. Rep. 8, 10948(2018).

Кулоновские корреляции как первопричина ферромагнитного перехода в режиме квантового эффекта Холла с $\nu=2$

А.Б.Ваньков*

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

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

Появившийся в последнюю декаду новый тип гетероструктур на основе ZnO/MgZnO позволяет заглянуть в физику двумерных электронных систем (ДЭС) существенно дальше, чем это было возможно в традиционных полупроводниках – кремнии и арсениде галлия. Причиной тому являются сильные межчастичные корреляции в сочетании с малым неоднородным уширением энергетических уровней. В этих двумерных системах роль кинетической энергии по сравнению с энергией многочастичного взаимодействия невелика. При таком неведомом ранее сочетании параметров «не работают» прежние теоретические модели, десятилетиями обкатанные на двумерном электронном газе. Качественную трансформацию могут претерпеть даже «хорошо изученные» одночастичные явления такие как целочисленный квантовый эффект Холла (КЭХ) – потому как вследствие кулоновского взаимодействия априори запутанной становится сама система уровней Ландау. В прежних магнитотранспортных исследованиях [1,2] показано, что само явление КЭХ в гетероструктурах ZnO остается, однако основное состояние системы сильно модифицировано.

В данной работе обнаружен ферромагнитный переход в режиме целочисленного КЭХ с четными факторами заполнения в системах на основе ZnO. Методами фотолюминесценции и неупругого рассеяния света удалось охарактеризовать фазовый состав двумерной электронной системы, наблюдать диапазоны параметров системы, отвечающие ферро- и парамагнитному упорядочению [3]. Построена фазовая диаграмма для состояния КЭХ $\nu=2$ при изменении параметров концентрации и угла наклона магнитного поля. Показано, что именно возрастающая роль кулоновских корреляций при уменьшении концентрации ДЭС является первопричиной данного фазового превращения.

Помимо феноменологии ферромагнитного перехода в настоящей работе проведен анализ микроскопического механизма этого явления. Методом неупругого рассеяния света прослежено поведение низкоэнергетических коллективных возбуждений при изменении концентрации ДЭС и показано, что ферромагнитный переход наступает вследствие смягчения *циклотронного спин-флип возбуждения* (CSFE) и последующего лавинообразного перехода электронов между соседними уровнями Ландау с противоположными спиновыми проекциями [4]. Экспериментальные данные по энергии вовлеченных коллективных возбуждений хорошо согласуются с расчетом, проведенным методами точной диагонализации и экранированного приближения Хартри-Фока.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН за счет гранта РНФ №19-72-30003.

Литература

- [1] A. Tsukazaki, M. Kawasaki et al., Phys. Rev. B 78, 233308 (2008).
- [2] D. Maryenko, J. Falson, et al., Phys. Rev. B 90, 245303 (2014).
- [3] A.B. Vankov, B.D. Kaysin, I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 96, 235401 (2017).
- [4] A.B. Vankov, B.D. Kaysin, I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 98, 121412 (R) (2018).

Изучение частично поляризованной по спину двумерной электронной системы методом время-разрешенного магнито-оптического вращения Керра

А.В.Ларионов*, Л.В.Кулик

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

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

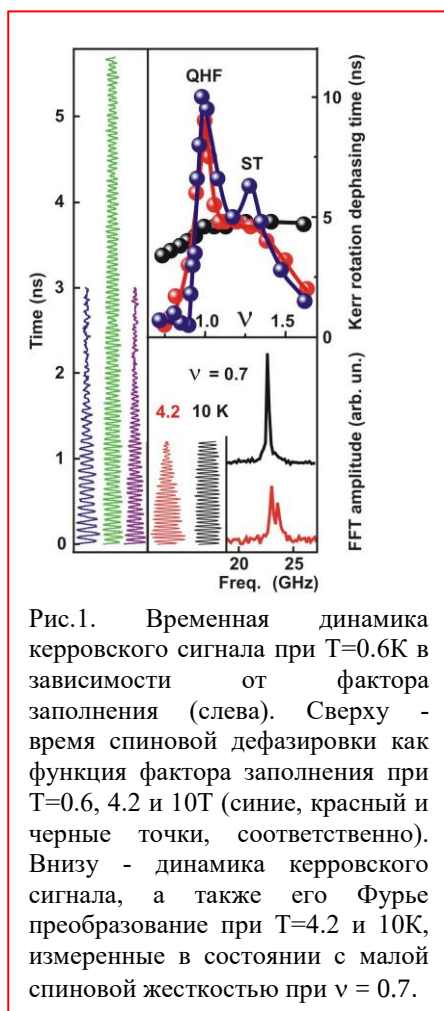


Рис.1. Временная динамика керровского сигнала при $T=0.6$ K в зависимости от фактора заполнения (слева). Сверху - время спиновой дефазировки как функция фактора заполнения при $T=0.6$, 4.2 и 10 K (синие, красный и черные точки, соответственно). Внизу - динамика керровского сигнала, а также его Фурье преобразование при $T=4.2$ и 10 K, измеренные в состоянии с малой спиновой жесткостью при $\nu = 0.7$.

С помощью время-разрешенного магнито-оптического эффекта Керра изучена когерентная спиновая динамика двумерных электронов в 17 нм GaAs квантовой яме (КЯ) в режиме Холловского ферромагнетика. Для фотовозбуждения использовался фемтосекундный титан-сапфировый лазер, перестраиваемый по длине волны, совместно с формирователем длительности импульсов. Образец помещался в криостат с соленоидом с изменяемым магнитным полем в диапазоне от 0 до 10 Тл во вставку для конденсации изотопа гелия ^3He . Конструкция вставки позволяла плавно менять температуру в диапазоне от 0.6 K до 15 K. Держатель образца содержал оптическое окно, через которое заводилось лазерное фотовозбуждение внутрь криостата и собирался полезный сигнал. Исследуемый образец монтировался в держателе таким образом, что наклон плоскости квантовой ямы к направлению вектора магнитной индукции составлял 45 градусов.

Измерялось время спиновой дефазировки двумерных электронов в окрестности фактора заполнения $\nu=1$ при температурах от 0.6 до 15 K. Обнаружено, что спиновая жесткость на факторе заполнения $\nu=1$ не меняется до температур порядка 5 K, при которых двумерная электронная система практически полностью деполаризована. 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. Переход из нового спин-коррелированного состояния в состояние с низкой спиновой жесткостью, характерной для одночастичной электронной системы, происходит пороговым образом по температуре, что, возможно, указывает на связь новой фазы с топологической фазой Березинского-Костерлица-Таулесса. Таким образом, продемонстрировано, что метод время-разрешенного эффекта Керра позволяет изучать спиновую жесткость, как в сильно- так и в слабо-поляризованной по спину двумерной электронной системе.

Литература

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

Гетероструктуры GaN/AlGaIn: новые фундаментальные свойства и их практические приложения

В.В.Соловьев,* И.В.Кукушкин

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

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

Приводится обзор недавних работ [1]-[2], посвященных исследованию оптических и транспортных свойств гетероструктур GaN/AlGaIn рекордного качества, достигаемого за счет роста методом молекулярно-пучковой эпитаксией на истинно-объемных подложках GaN с крайне малой плотностью дислокаций (менее 10^5 см^{-2}), и в условиях подавления остаточного донорного легирования кислородом (до уровня порядка 10^{16} см^{-3}).

Спектры низкотемпературной фотолюминесценции таких структур отличаются рекордно узкими линиями (ширина порядка 100 мкэВ) рекомбинации связанных экситонов в материале GaN. Это позволяет идентифицировать химическую природу (кислород, кремний, магний) и производить количественные сравнения концентраций соответствующих примесных атомов при их количествах, недоступных для детектирования каким-либо другим методом.

Присутствие на поверхности гетероструктур барьера $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0.06$) с тонким закрывающим слоем GaN приводит к появлению в спектре фотолюминесценции новой спектральной особенности, впервые однозначно идентифицируемой как рекомбинация двумерных электронов. Это подтверждается: (а) совпадением ширины данной линии с энергией Ферми для концентрации электронов порядка $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, установленной из транспортных исследований, (б) наблюдением осцилляций интенсивности данной линии в магнитном поле, периодических в зависимости от обратной величины поля, (в) наблюдением ее расщепления на характерные уровни Ландау.

Крайне неожиданным фактом является практически полное подавление двумерного канала (отсутствие электронов) в данной гетероструктуре при выключении источника УФ-света в условиях комнатной температуры. Установлено, что проводящий канал возникает и быстро насыщается при очень малых уровнях плотности фотовозбуждения порядка нескольких пВт/см^2 . При температуре ниже 100 К канал оказывается «вмороженным» (persistent conductivity), то есть не исчезает при выключении света. Комбинацией магнитооптических и магнитотранспортных исследований показано, что увеличение плотности фотовозбуждения на шесть порядков ведет к увеличению плотности двумерных электронов в полтора раза, до величины $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Образцы с затвором, изготовленные на основе данной гетероструктуры, демонстрируют возможность электростатического заполнения проводящего канала электронами, тем самым открывая возможности создания «нормально-открытых» транзисторов, крайне желаемых для практических приложений.

Работа произведена при частичном финансировании в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] S. Schmelt, V.V. Solovyev, S. Wirth et al., Journal of Vacuum Science and Technology B 37, 021210 (2019).
- [2] S. Schmelt, S. Wirth, V.V. Solovyev et al., Phys. Status Solidi A 217, 1900732 (2020).

Инжекционный полупроводниковый лазер с циркулярно-поляризованным излучением

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

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

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

Создание компактных устройств нанометровых размеров, с помощью которых можно управлять состоянием поляризации излучаемого света, является одной из центральных проблем нанофотоники. Компактные источники циркулярно-поляризованного излучения, в частности полупроводниковые лазеры, открывают возможности их практического использования в таких интенсивно развивающихся областях как квантовая информационная технология для передачи и записи информации, оптоэлектроника и нанофотоника. Обычно изменение поляризации света осуществляется с помощью волновых пластинок из двулучепреломляющего материала, которые имеют сравнительно большую толщину. Одним из возможных решений задачи создания компактных поляризационных устройств является использование для этой цели наноструктур на основе обычных ахиральных A^3B^5 полупроводников, в которых с помощью травления в верхнем слое формируется модулированная структура фотонного кристалла, обладающего хиральной симметрией. В результате, в подобных наноструктурах возникает неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод без приложения внешнего магнитного поля.

Экситонные поляритоны в полупроводниковых микрорезонаторах с квантовыми ямами возникают в режиме сильной связи между экситонами и фотонами и поэтому обладают свойствами обоих этих возбуждений. Выше некоторой критической плотности частиц в системе экситонных поляритонов может наблюдаться явление динамической конденсации. В лежащем в основе этого явления нелинейном процессе вынужденного стимулированного рассеяния поляритонов в основном состоянии нижайшей по энергии дисперсионной ветви может накапливаться макроскопическое число поляритонов, распад которых в таком конденсате происходит за счет ухода фотонов из микрорезонатора в виде монохроматического когерентного света. Обычное излучение полупроводникового лазера основано на стимулированном излучении фотонов, что означает достаточно строгие требования к минимальному количеству энергии, необходимой для его работы. Конденсат экситонных поляритонов при их вынужденном рассеянии, в принципе, может обеспечить более энергоэффективную генерацию когерентного света.

Недавно была продемонстрирована возможность создания поляритонного лазера с электрической накачкой на основе полупроводникового микрорезонатора с легированными Брэгговскими зеркалами. Следующим шагом явилось создание инжекционного полупроводникового лазера с циркулярно-поляризованным излучением.

В настоящей работе изучены основные характеристики и возможности управления ими экспериментально реализованного режима многомодового стимулированного лазерного излучения с высокой степенью циркулярной поляризации в полупроводниковых наноструктурах на основе планарных микрорезонаторов с квантовыми ямами и с периодической квадратной решеткой фотонного кристалла хиральной симметрии на верхнем Брэгговском зеркале при его частичном травлении. Возбуждение стимулированного излучения осуществлялось с помощью постоянной или импульсной электрической накачки. Исследованы зависимости спектров и интенсивности излучения, степени его циркулярной поляризации, углового и пространственного распределения от величины тока, протекающего через лазерную структуру.

Работа частично поддержана проектами РФФИ № 20-02-00534 и № 19-02-00697.

Исследование поляритонов в монослоях MoSe_2 в одномерном фотонном кристалле

А.С.Бричкин^{1*}, Ф.А.Бенимецкий², Е.А.Хестанова²

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

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

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

В работе приводятся результаты исследования поляритонов, образованных особыми локализованными оптическими модами фотонного кристалла (bound states in continuum-BIC) [1] и экситонами в монослое MoSe_2 . Исследуемый образец представляет собой одномерный фотонный кристалл из полосок Ta_2O_5 на поверхности подложки из SiO_2/Si , покрытый слоем hBN, а затем монослоем MoSe_2 , как показано на Рис.1.. Электромагнитное поле, локализованное в микрорезонаторе, образованном фотонным кристаллом, взаимодействуя с экситонами в монослое MoSe_2 , образует одномерные поляритоны.

Мотивацией для создания и исследования подобных структур послужило то, что в системе поляритонов в таких структурах ожидается существенное усиление нелинейных эффектов.

Изучение поляритонов осуществлялось посредством измерения разрешённых по углу спектров отражения при близких к нормальному углах падения излучения от галогеновой лампы и спектров фотолуминесценции при нерезонансном возбуждении титан-сапфировым импульсным лазером.

Эти измерения позволили подтвердить сильную связь между экситонами и BIC-модами фотонного кристалла и измерить расщепление Раби $R \approx 27$ мэВ и добротность резонатора порядка $Q \approx 900$ для поляритонов этого типа [2].

Установлено, что ширина линии отражения нижней поляритонной ветви составляет около 2 мэВ. Обнаружено, что ширины линии поляритонов в спектре отражения существенно зависят от одномерного квазиимпульса. Учёт динамического сужения линий поляритонов и аппроксимация поляритонных дисперсионных кривых, полученных в спектрах отражения с помощью модели связанных осцилляторов, позволил разделить вклад различных механизмов уширения в ширину линии: радиационного, безызлучательного и неоднородного.

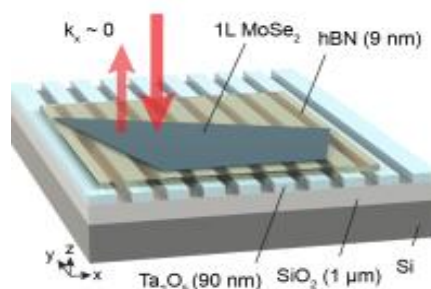


Рис.1. Образец и схема эксперимента. Ширина полосок Ti_2O_5 270 нм, период решетки 500 нм, глубина модуляции слоя Ti_2O_5 90 нм. Размер флейка hBN толщиной 9 нм и монослоя MoSe_2 порядка 100 мкм, т.е. составляет около 200 периодов решётки Ti_2O_5 .

Литература

- [1] Hsu, C., Zhen, B., Stone, A. et al., Nat Rev Mater 1, 16048 (2016).
- [2] V. Kravtsov, E. Khestanova, F. Benimetskiy et al., arXiv: 1905.13505 (2019).

Когерентные осцилляции в экситон-поляритонной системе в режиме джозефсоновского перехода при импульсной широкоапертурной резонансной оптической накачке

А.А.Деменев*

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

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

При межзонной оптической накачке, для наблюдения когерентных осцилляций поляритонной плотности в режиме джозефсоновского перехода (ДП), необходимо создать устойчивый однонаправленный поток поляритонов на начальном этапе формирования конденсата [1]. Целью настоящей работы было изучение когерентных осцилляций в режиме ДП для резонансно возбуждаемого поляритонного «квазиконденсата» [2] с низкой начальной пространственной когерентностью.

Для возбуждения «квазиконденсата» поляритонов использовались 1.5-пс лазерные импульсы ($\Delta E \approx 1.5$ мэВ) с широкой угловой апертурой. Образующийся «горячий» некогерентный поляритонный газ обладал примерно постоянной плотностью в г-пространстве. Для изучения поляритонного ДП были выбраны две близкорасположенные потенциальные ямки (ширины ям ~ 3 и 6 мкм, ширина барьера ~ 1 мкм), образованные флуктуациями случайного потенциала. Оказалось, что для наблюдения когерентных осцилляций в «квазиконденсате» недостаточно вырождения энергии поляритона в двойной асимметричной яме ($\delta \approx 40$ мкэВ), а необходимо также селективное возбуждение в к-пространстве, например, возбуждение поляритонов с $k > 0$ (рис.1). Из рис.1а, период осцилляций $\tau \approx 60$ пс. За время смены направления потока $\tau/2$ поляритоны перемещаются на ~ 6 мкм (рис.1б), что соответствует размеру ДП. Таким образом, для наблюдения когерентных осцилляций в поляритонном «квазиконденсате» в режиме ДП при импульсной накачке необходимо наличие однонаправленного потока поляритонов в направлении ДП для формирования сильного дисбаланса населенностей в ямах и синхронизации фаз ВФ конденсатов в ДП.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] K.G. Lagoudakis, B. Pietka, M. Wouters, R. Andrer, and B. Deveaud-Plerdran, Phys. Rev. Lett. 105, 120403 (2010).
- [2] Yu.M. Kagan, B.V. Svistunov, and G.V. Shlyapnikov, Sov. Phys. JETP, 74(2), 279 (1992).

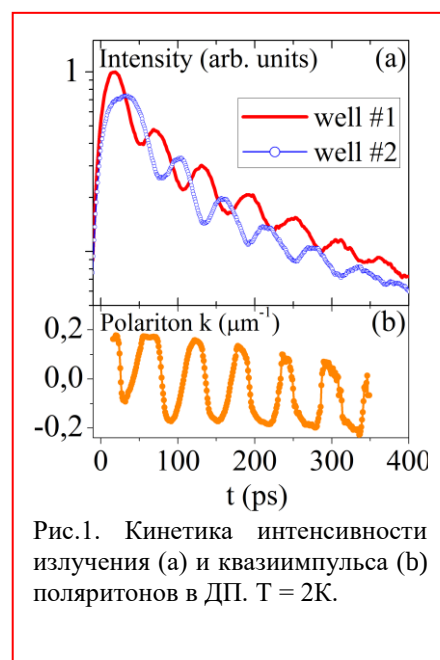


Рис.1. Кинетика интенсивности излучения (а) и квазиимпульса (б) поляритонов в ДП. $T = 2\text{K}$.

Новый метод создания высококачественных многослойных структур на основе дихалькогенидов переходных металлов

А.В.Черненко*

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

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

Создание высококачественных многослойных структур на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) является актуальной темой современной физики ван-дер-ваальсовых материалов. Однако монослои ДПМ деградируют при контакте с атмосферой. Дегерация проявляется в значительном, порядка 20-30 мэВ, уширении линий фотолюминесценции слоёв. Для того чтобы избежать дегерации, моно- и гетерослои помещаются между тонкими, 10-50 нм, слоями гексагонального нитрида бора (hBN).

Технология создания инкапсулированных гетероструктур типа hBN-WSe₂-hBN, показанных на Рис.1, с помощью последовательного переноса слоёв на подложку SiO₂ включает в себя как промежуточный этап перенос слоёв ДПМ и hBN на слой

полидиметилсилоксана (PDMS), а с него – на собираемую структуру. Как показала практика, такая процедура приводит к появлению на интерфейсах гетероструктур пузырей микронного размера. Пузыри нарушают однородность структур и существенно ухудшают их качество. Для избежания контакта переносимых слоёв с PDMS была предложена новая техника [1], заключающаяся в использовании для переноса комбинацию PDMS с тонким слоем или пузырьком карбоната полипропилена PPC на поверхности. Чистота интерфейсов при сборке гетероструктур достигается отрывом монослоёв от подложки при температуре 110 °С при контакте с hBN и переносе получившегося сэндвича на другой монослой или слой hBN. Эта техника, изначально предложенная для графена, была успешно применена нами для получения структур с ДПМ. Визуальная характеристика гетероструктур, полученных таким способом, продемонстрировала существенное уменьшение плотности пузырей в интерфейсах. Хотя полностью избавиться от них не получается, тем не менее применение этого метода позволяет получать гетероструктуры с однородными областями без пузырей с характерными размером 15 × 15 мкм.

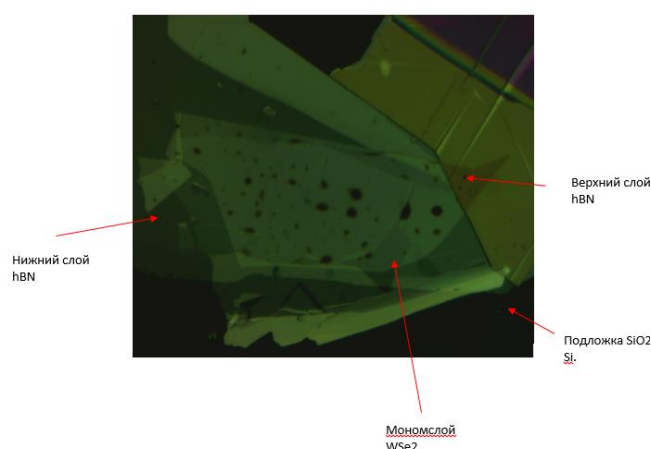


Рис.1. Структура hBN-WSe₂-hBN на подложке SiO₂. Размер экрана соответствует размерам 110 x 110 мкм². Черные точки-пузыри.

Литература

- [1] F. Pizzocchero et al., Nature Communications 7, 11894 (2016).

Эффекты запаздывания в спектре экранированных двумерных плазмонов

И.В.Андреев*, Н.Д.Семенов, В.М.Муравьев*ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: andreev@issp.ac.ru*

Исследования взаимодействия света с возбуждениями в среде представляет собой обширную и важную область задач современной физики конденсированного состояния. Одним из примеров такого взаимодействия являются эффекты запаздывания для плазменных волн в двумерных электронных системах (ДЭС), приводящие к гибридизации плазмонов со светом и возникновению гибридных квазичастиц – плазмон-поляритонов. Влияние эффектов запаздывания на спектр обычных двумерных плазмонов хорошо изучено [1, 2]. Представляет интерес экспериментальное исследование проявлений эффектов запаздывания также и в спектре сильно экранированных двумерных плазмонов, чего до настоящего времени не было сделано.

Современная теория [3] предсказывает, что для экранированных двумерных плазмонов в магнитном поле систематический учёт эффектов запаздывания приводит к перенормировке плазменной и циклотронной частот, причём эффекты гибридизации плазмонов со светом в экранированном случае оказываются сильнее, чем в неэкранированном.

В данной работе мы экспериментально исследовали микроволновый отклик дисков ДЭС, оснащенных металлическим задним затвором. Была исследована магнитодисперсия экранированного магнитоплазмона в диске, в условиях, когда одновременно реализуются режим сильного экранирования и режим сильного запаздывания. Экспериментально установлено, что в режиме сильного запаздывания за счет релятивистских эффектов происходит перенормировка как плазменной, так и циклотронной частот, приводящая к их уменьшению в несколько раз, при этом уравнение для магнитодисперсии плазменных волн в диске сохраняет свой вид для перенормированных частот. Показано, что степенью проявления эффектов запаздывания, т. е. силой плазмон-фотонного взаимодействия можно управлять, изменяя электронную плотность в ДЭС либо расстояние между ДЭС и затвором.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-02-00753).

Литература

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

Время релаксации циклотронного резонанса в двумерной электронной системе

И.В.Андреев*, Н.Д.Семенов, В.М.Муравьев

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

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

В данной работе проведено экспериментальное сравнение циклотронного и транспортного времени столкновительной релаксации в двумерных электронных системах (ДЭС). Под циклотронным временем релаксации понимается время, определяющее ширину линии объемной магнитоплазменной моды в переделе сильных магнитных полей, когда она асимптотически стремится к одночастичному циклотронному резонансу. В работе удалось реализовать режим, в котором излучательный вклад в ширину линии циклотронного резонанса пренебрежимо мал. Обычно (см. напр. [1]) принято считать, что из-за неэффективности малоуглового рассеяния транспортное время релаксации больше циклотронного. В данной работе, в частности, показано, что это утверждение необязательно верно.

В эксперименте была исследована зависимость циклотронного и транспортного времени релаксации от температуры в диапазоне 1.5-100 К для образца с электронной плотностью $2.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Показано, что с ростом температуры уменьшается как циклотронное, так и транспортное время релаксации, причем циклотронное время стремится к транспортному. Это можно объяснить влиянием различных механизмов релаксации: при низких температурах доминирует рассеяние на дальнедействующем потенциале доноров, а при высоких – электрон-фононное рассеяние.

Также была исследована зависимость времени релаксации циклотронного резонанса от электронной плотности ДЭС в диапазоне значений $2 \cdot 10^9$ - $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (Рис. 1). Экспериментально показано, что в области малых концентраций (менее $4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) циклотронное время релаксации может в несколько раз превосходить транспортное. Этот результат показывает, что в условиях низких электронных концентраций и сильной локализации в ДЭС существуют группы носителей заряда с существенно отличающимися временами релаксации. При этом измеренные в эксперименте циклотронные и транспортные времена соответствуют величинам, усредненным по разным группам носителей заряда.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН.

Литература

[1] R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto, Phys. Rev. Lett. 106, 196404 (2011).

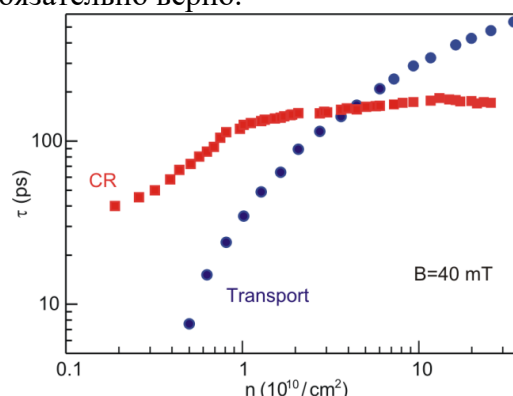


Рис. 1. Циклотронное (красные квадраты) и транспортное (синие круги) время столкновительной релаксации в зависимости от электронной концентрации в образце. Данные приведены для магнитного поля 40 мТл и температуры 1.5 К.

Люминесценция двумерного электронного газа низкой плотности: Вигнеровский кристалл или экситон Махана?

В.Е.Бисти*

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

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

Экспериментальное изучение сильно коррелированных двумерных систем интенсивно развивается, появляются новые объекты и методы исследования. Так, в работе [1] для изучения эффектов перенормировки энергии не только на уровне Ферми, но и во всей области спектра двумерных электронов использовался метод анализа спектров излучательной рекомбинации электронов. Изучались спектры низкотемпературной люминесценции двумерного электронного газа в гетеропереходе MgZnO/ZnO , в которых 2D электроны рекомбинируют с локализованными фотовозбужденными дырками валентной зоны. В магнитном поле отчетливо видны линии люминесценции для отдельных уровней Ландау, что позволяет утверждать существование «квазидырок» как хорошо определенных квазичастиц для всех значений энергии. При промежуточных значениях параметра r_s многочастичная задача не имеет корректного теоретического описания как для основного состояния, так и для возбуждений. Основное состояние двумерной электронной системы в зависимости от r_s может быть электронным газом, электронной Ферми-жидкостью или Вигнеровским кристаллом. При учете примесей значение r_s перехода жидкость-кристалл сдвигается до более реалистичного значения $r_s=7$ [2]. Как впервые было предложено в работе [3], при низких температурах вакансии в кристалле вследствие туннелирования делокализованы и могут рассматриваться как квазичастицы с квазиимпульсом k – вакансии. Поэтому возможно рассмотреть систему двумерных электронов низкой плотности как Вигнеровский кристалл, образующий треугольную решетку, а энергию вакансии использовать в приближении сильной связи. Анализ формы полосы люминесценции для гетероперехода MgZnO/ZnO позволяет интерпретировать образующуюся в процессе «квазидырку» как вакансион. Однако возможно и другое объяснение, предлагаемое авторами [1]. При низкой электронной плотности и температуре электронного газа в люминесценции существует особенность – увеличение интенсивности вблизи энергии Ферми, придающее определенную форму полосе люминесценции. Эта особенность возникает вследствие Кулоновского взаимодействия и называется «экситон Махана» [4,5]. По форме полосы однозначного утверждения сделать не удастся, однако в эксперименте [1] отмечается необычная трансформация спектра в магнитном поле – веер уровней Ландау выглядит «инвертированным». Расчет, проведенный в квазиклассическом приближении, показывает, что картина уровней Ландау вакансион выглядит зеркальной (инвертируется), в зависимости от ферромагнитного или антиферромагнитного состояния Вигнеровского кристалла.

Литература

- [1] V.V. Solovyev and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 96, 115131 (2017).
- [2] S.T. Chui and B. Tanatar, Phys. Rev. B 74, 458 (1995).
- [3] А.Ф. Андреев, И.М. Лифшиц. ЖЭТФ 56, 2057 (1969).
- [4] G.D. Mahan, Phys. Rev. 153, 882 (1967).
- [5] S. Schmitt-Rink, C. Ell and H. Haug, Phys. Rev. B 33, 882 (1986).

Межподзонный плазмон как детектор спиновой поляризации в двумерной электронной системе на основе MgZnO / ZnO

А.Б.Ваньков*

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

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

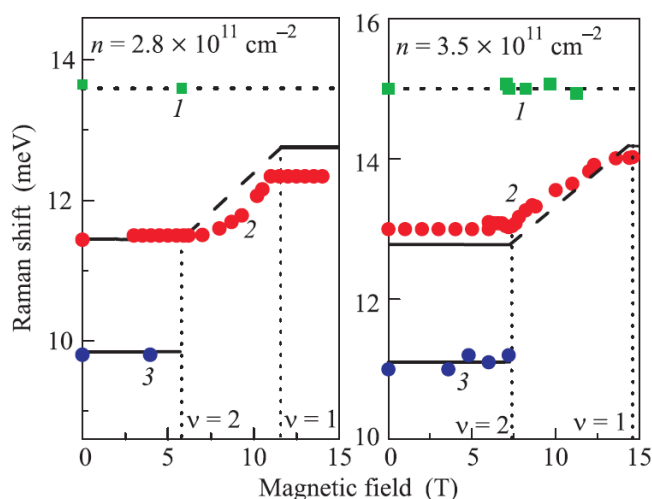


Рис.1. Энергия межподзонных возбуждений в зависимости от магнитного поля для трех образцов с разными концентрациями. Красными символами обозначены энергии возбуждений зарядовой плотности (CDE). Сплошными линиями показаны результаты теоретического расчета. Для наглядности штриховыми линиями показана трансформация энергии от неполяризованного по спину состояния при $v=2$ к спин-поляризованному состоянию при $v=1$.

межподзонного плазмона может выступать в качестве детектора спиновой поляризации основного состояния ДЭС [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН за счет гранта РНФ №19-72-30003.

Литература

- [1] A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin, Phys.Rev.B 96, 235401 (2017).
- [2] Л.В. Кулик, А.Б. Ваньков, Б.Д. Кайсин, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, том 105, вып. 6, с. 358-362 (2017).

Методом неупругого рассеяния света исследована магнитополевая динамика межподзонных коллективных возбуждений в двумерных электронных системах (ДЭС) на основе гетероструктур $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O} / \text{ZnO}$. Обнаружено, что при изменении спиновой поляризации в условиях перехода от парамагнитного состояния (с фактором заполнения $v = 2$) к холловскому ферромагнетику ($v = 1$) энергия межподзонного магнитоплазмона значительно изменяется (Рис.1, красные символы). Это эффект согласуется с данными по альтернативному зондированию спиновой поляризации [1]. Проведенный теоретический анализ показал связь данного эффекта с сопутствующим изменением обменного взаимодействия в энергии возбуждения. Ввиду этого энергия

Быстрый спиновый транспорт в холловском диэлектрике

А.В.Горбунов,* А.С.Журавлев, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев

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

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

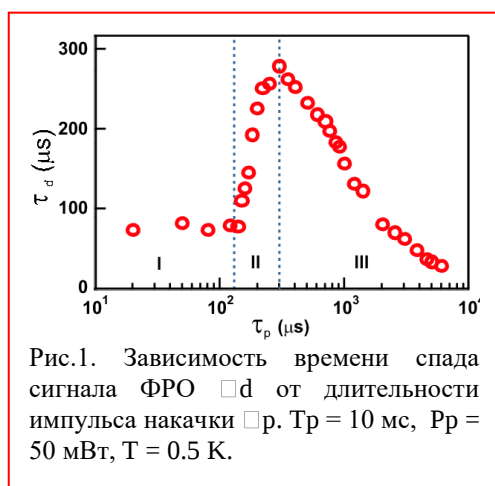


Рис.1. Зависимость времени спада сигнала ФРО τ_d от длительности импульса накачки τ_p . $T_p = 10$ мс, $P_p = 50$ мВт, $T = 0.5$ К.

В квантово-холловском диэлектрике (фактор заполнения $\nu = 2$) нижайшее по энергии возбуждение – это триплетный циклотронный магнитоэкситон (ТЦМЭ), состоящий из электрона на пустом первом уровне Ландау и электронной вакансии (Ферми-дырки) на полностью занятом нулевом уровне Ландау. ТЦМЭ представляет собой оптически не активный композитный бозон со спином $S = 1$, время жизни которого может достигать ≈ 1 мс [1]. За счет столь большого времени жизни удается создать ансамбль ТЦМЭ с плотностью $n_{ex} \geq 10^{10} \text{ см}^{-2}$ с помощью довольно слабого фотовозбуждения, что при температурах $T \leq 1$ К

приводит к формированию нового состояния – *магнетофермионного конденсата* (МФК), способного быстро растекаться на макроскопические расстояния [1, 2].

Прямое измерение скорости переноса спина с помощью визуализации растекания МФК здесь невозможно: попытка сформировать конденсат в малом пятне с помощью одного короткого импульса накачки неизбежно приведет к перегреву электронной системы. Оценить скорость переноса спина $v_{\text{проп}}$ удалось в экспериментах с импульсно-периодическим фотовозбуждением в широком пятне накачки диаметром $d_p \approx 1.5$ мм. Зондирование проводилось с помощью фотоиндуцированного резонансного отражения (ФРО) излучения непрерывного лазера, настроенного в резонанс с переходом электрона с уровня тяжелой дырки валентной зоны на уровень Ферми-дырки в зоне проводимости. Период следования импульсов накачки, $T_p = 10$ мс, превышал времена всех переходных процессов в системе. При фиксированной пиковой мощности накачки P_p и постепенном наращивании длительности импульса τ_p реализуются три режима (см. Рис. 1). В разреженном газе ТЦМЭ (область I) заполнены состояния вблизи нулевых квазиимпульсов, $q \approx 0$, экситоны не успевают уходить из пятна накачки, а время спада сигнала ФРО по окончании импульса накачки τ_d – это время их энергетической релаксации. В режиме II за счет экситон-экситонного рассеяния начинают заполняться состояния вблизи минимума дисперсионной зависимости ТЦМЭ, $q \approx 1/l_B \approx 10^6 \text{ см}^{-1}$, откуда релаксация затруднена из-за невозможности отдать столь большой импульс, поэтому τ_d возрастает. Наконец, при высокой плотности ТЦМЭ (область III) образуется МФК, и время τ_d связано со скоростью разбегания экситонов из пятна накачки: $\tau_d \approx d_p/2v_{\text{проп}}$. Минимальное измеренное время спада 30 мкс дает оценку для скорости 25 м/с. Столь высокие скорости переноса спина делают квантово-холловский изолятор перспективным объектом для быстрой передачи сигналов в спиновой подсистеме.

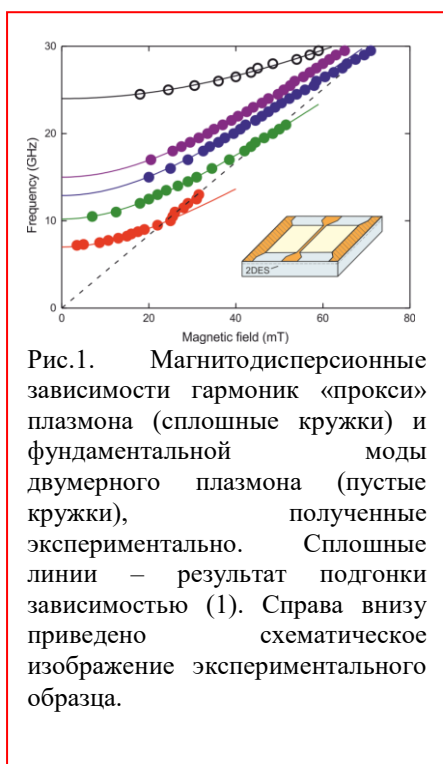
Литература

- [1] L.V. Kulik, A. S. Zhuravlev, S. Dickmann, A.V. Gorbunov, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, and S. Schmult, Nature Comm. 7, 13499 (2016).
- [2] L.V. Kulik, V.A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A.V. Gorbunov, V.V. Solovyev, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, and S. Schmult, Scientific Rep. 8, 10948 (2018).

Спектр двумерных «прокси» плазмонов

П.А.Гусихин,^{1*} А.М.Зарезин,^{1,2} А.А.Дремин,¹ В.М.Муравьев¹¹ИФТТ РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2²МФТИ (НИУ), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9

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



Недавно было обнаружено, что в двумерной электронной системе (ДЭС), частично экранированной металлическим затвором, возникает совершенно новое семейство плазменных возбуждений, которые отличаются как от обычных двумерных плазмонов, так и от экранированных плазмонов [1,2]. Теоретически было показано, что в случае, если затвор имеет форму длинной полосы, шириной W , то закон дисперсии новых «прокси» плазмонов (proximity plasmons) описывается формулой:

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

где n_s – концентрация электронов в ДЭС, $\hbar$ – расстояние от ДЭС до затвора, m^* – эффективная масса электронов в ДЭС.

В данной работе путём подбора геометрических параметров образца, схематическое изображение которого, приведено на Рис. 1, удалось возбудить серию стоячих плазменных мод, что позволило надёжно экспериментально подтвердить

теоретическое предсказание (1). Образцы были изготовлены из высококачественных гетероструктур $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, содержащих одиночную квантовую яму. Концентрация электронов в ДЭС составляла $n_s = 2.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а подвижность – $\mu = 4 \times 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Для проведения экспериментов использовалась оптическая методика детектирования микроволнового поглощения в ДЭС.

В результате были получены магнитопольные зависимости частоты резонансов (Рис. 1), хорошо описываемые теоретической зависимостью:

$$\omega^2(B) = \omega^2(0) + \omega_c^2, \quad (2)$$

где ω_c – циклотронная частота, за исключением того факта, что из-за эффектов запаздывания наклон зависимости меняется. В нулевом магнитном поле значения частот нескольких последовательных мод отлично описываются формулой (1), если подставить значения волнового вектора $q = \pi N/L$, где L – длина полосы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

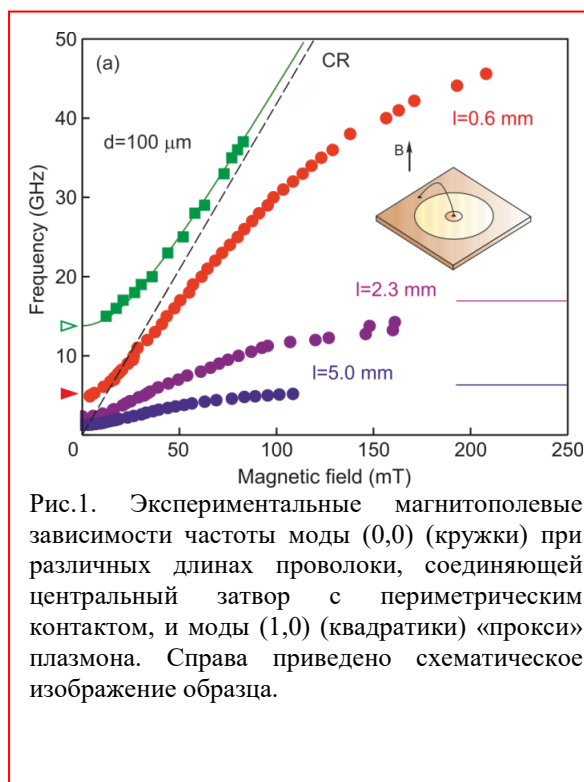
Литература

- [1] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).
 [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406(R) (2019).

Физическая природа двумерных релятивистских плазмонов

П.А.Гусихин,^{1*} А.М.Зарезин,^{1,2} А.А.Заболотных,³ В.А.Волков,³ В.М.Муравьев¹¹ИФТТ РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2²МФТИ (НИУ), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9³ИРЭ РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп.7

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



В данной работе были исследованы образцы, содержащие ДЭС, над которой располагались металлические затворы в виде дисков (Рис. 1). При этом затвор и периметрический контакт к ДЭС были соединены металлической проволокой. В такой системе наблюдалась дополнительная осесимметричная мода «прокси» плазмона (Рис. 1). Было показано, что проволока выступает в качестве резонатора, который связывается с плазменным возбуждением. Было исследовано изменение характеристик гибридного плазмон-поляритона в зависимости от длины проволоки, на основании чего сделан вывод, что наблюдаемое возбуждение является релятивистским плазмоном.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

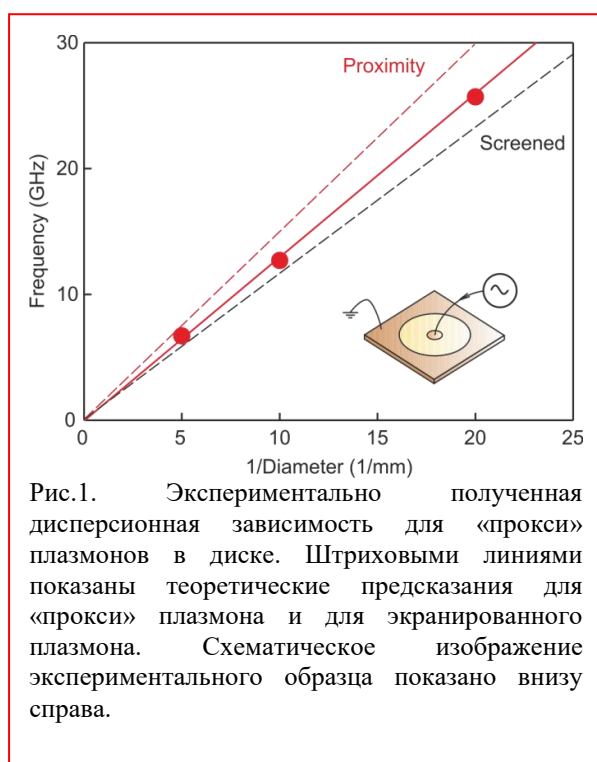
Литература

- [1] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, I.V. Andreev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 114, 106805 (2015).
- [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406(R) (2019).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Semiconductors 53, 1870 (2019).

Двумерные «прокси» плазмоны в диске и кольце

П.А.Гусихин,^{1*} А.М.Зарезин,^{1,2} А.А.Фортунов,¹ В.М.Муравьев¹¹ИФТТ РАН, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2²МФТИ (НИУ), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9

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



Недавно было обнаружено, что в двумерной электронной системе (ДЭС), частично экранированной металлическим затвором, возникает новое семейство «прокси» плазмонов (proximity plasmon) [1,2]. Кроме рассмотренного в предыдущих работах случая затвора в виде полоски, также был рассмотрен случай диска [3], в котором была получена следующая дисперсионная зависимость:

$$\omega(q) = \Omega \sqrt{\frac{n_s e^2 h}{m^* \epsilon \epsilon_0 d}}, \quad (1)$$

где n_s – концентрация электронов в ДЭС, h – расстояние от ДЭС до затвора, m^* – эффективная масса электронов в ДЭС, d – диаметр диска, Ω – корень уравнения:

$$\partial_\Omega J_m(\Omega) + m J_m(\Omega) = 0.$$

В данной работе были исследованы образцы, содержащие ДЭС, над которой располагались металлические затворы в виде дисков диаметром от $d = 50$ мкм до 200 мкм (Рис. 1). Образцы были изготовлены из высококачественных гетероструктур GaAs/Al_xGa_{1-x}As, содержащих одиночную квантовую яму. Концентрация электронов в ДЭС составляла $n_s = 2.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а подвижность – $\mu = 4 \times 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Для проведения экспериментов использовалась оптическая методика детектирования микроволнового поглощения в ДЭС.

По результатам экспериментов была построена дисперсионная зависимость «прокси» плазмона в диске (Рис. 1). Стоит отметить, что, в отличие от случая полоски, дисперсии «прокси» плазмона и экранированного имеют похожие линейные законы и различаются только наклоном, что в прошлом приводило к тому, что «прокси» плазмон принимался за экранированный.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 99,165304 (2019).
- [2] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406(R) (2019).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Semiconductors 53, 1870 (2019).

Использование двумерных фотонных кристаллов для спектроскопии в субтерагерцовом частотном диапазоне

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

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

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

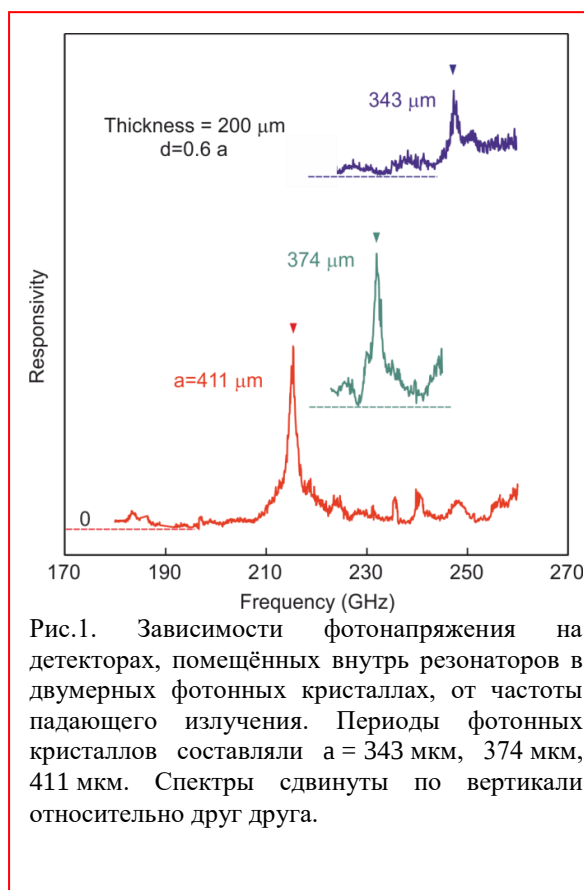


Рис.1. Зависимости фотонапряжения на детекторах, помещённых внутрь резонаторов в двумерных фотонных кристаллах, от частоты падающего излучения. Периоды фотонных кристаллов составляли $a = 343$ мкм, 374 мкм, 411 мкм. Спектры сдвинуты по вертикали относительно друг друга.

Двумерные фотонные кристаллы представляют собой двумерную структуру с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью. Было показано, что в такой структуре могут существовать фотонные запрещённые зоны [1], а в резонаторе внутри фотонного кристалла – резонаторная мода, лежащая внутри запрещённой зоны фотонного кристалла [2]. Высокая достижимая добротность резонаторной модой и малый пространственный объём резонатора делают возможным построение спектроскопии на основе резонаторов в двумерных фотонных кристаллах.

В данной работе в качестве чувствительного элемента использовался полупроводниковый детектор [3], преимущество которого состоит в том, что он может быть изготовлен в едином технологическом цикле с фотонным кристаллом непосредственно внутри микрорезонатора. Фотонный кристалл

представлял собой треугольную решётку отверстий в подложке GaAs, а микрорезонатор – несколько пропущенных отверстий в этой решётке.

На рисунке 1 показаны спектры фотоотклика детекторов, помещённых в микрорезонаторы в фотонных кристаллах с различными периодами. На этих спектрах видны острые пики, соответствующие возбуждению резонаторных мод. Добротность резонаторов в данной работе превышала $Q = 200$. Нами были исследованы фотонные кристаллы с различными решётками, периодами и конфигурациями микрорезонаторов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] M. Plihal, A. Shambrook, A.A. Maradudin, P. Sheng, Opt. Commun. 80, 199 (1991).
- [2] O. Painter, R.K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J.D. O'Brien, P.D. Dapkus, I. Kim, Science 284,1819 (1999).
- [3] V.M. Muravev and I.V. Kukushkin, Appl. Phys. Lett. 100, 082102 (2012).

Акустооптические переключения поляризации экситон-поляритонной системы в полупроводниковых микрорезонаторах

А.А.Деменев*

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

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

Экситонные поляритоны возникают в полупроводниковых микрорезонаторах (МР) в режиме сильной экситон-фотонной связи. В работе [1] было показано, что поляризационным состоянием поляритонной системы можно управлять изменения частоту экситонного уровня акусто-деформационными импульсами. В результате при фиксированных интенсивности и поляризации накачки возможны контролируемые сверхбыстрые переключения между состояниями с линейной и циркулярной поляризациями поляритонной моды.

В представленной работе экситон-поляритонный конденсат возбуждался резонансно по нормали к GaAs-МР 50-нс лазерными импульсами с $\hbar\omega = E_{LP} + 140$ мкэВ. Импульсы деформации (~10 пс) формировались на поверхности GaAs-подложки при поглощении 200-фс лазерных импульсов и достигали КЯ в активном слое МР за 73.9 нс. При прохождении области с КЯ импульс деформации вызывал сдвиг уровня поляритона до 90 мкэВ и резкое (~250 пс) возрастание в 12 раз пропускания МР в поляризации σ^+ (переход σ^+ -подсистемы на верхнюю ветвь S-кривой) (рис.1а). При этом, пропускание в σ^- поляризации возрастало лишь в 1.5 раза, т.е. σ^- -подсистема оставалась на нижней ветви S-кривой (рис.1б). Следовательно, импульс деформации переключал поляризацию поляритонной моды с практически линейной ($\rho_{lin}=0.98$, $\rho_{circ}=0.2$) на циркулярную с $\rho_{circ}=0.85$. Таким образом, в работе показано, что сверхкороткие обратимые изменения частоты экситонного уровня могут приводить к переключению поляризации поляритонной системы на пикосекундном масштабе времен.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] S.S. Gavrilov, A.A. Demenev, V.D. Kulakovskii, JETP Letters, 100, 817 (2015).

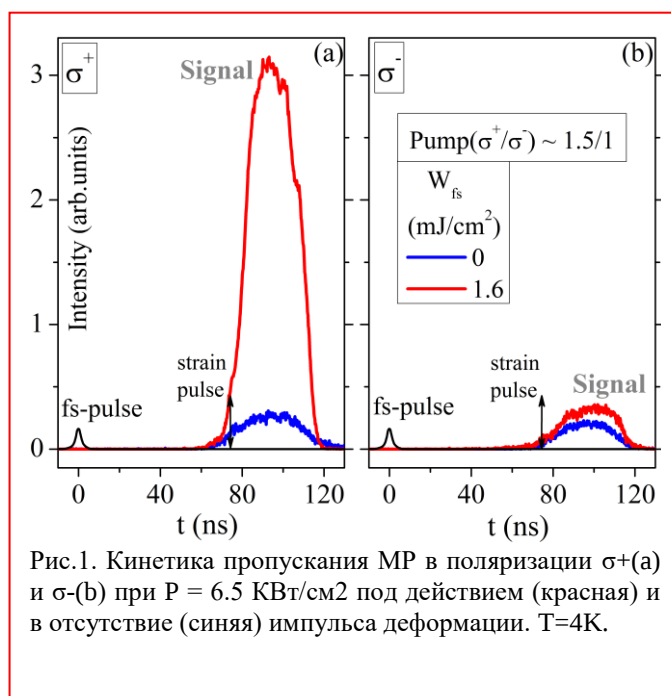


Рис.1. Кинетика пропускания МР в поляризации σ^+ (a) и σ^- (b) при $P = 6.5$ кВт/см² под действием (красная) и в отсутствие (синяя) импульса деформации. $T=4$ К.

Спиновая релаксация в холловском ферромагнетике

А.С.Журавлев*, Л.В.Кулик

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

*e-mail: and.zhur@gmail.com

Исследования явлений спиновой релаксации в двумерных электронных системах представляет собой широкую и еще не до конца описанную область. Полученные результаты могут найти применение в спинтронике, одной из наиболее быстро развивающихся отраслей прикладной физики и технологии [1]. В представленном докладе обсуждаются эксперименты по релаксации спиновых возбуждений в окрестности фактора заполнения 1, холловском ферромагнетике. В предыдущих исследованиях время релаксации лежало в диапазоне от 1 [2] до 10 нс, такие времена не давали ответа на то, какой механизм релаксации доминирует, кроме того время спиновой дефазировки невзаимодействующих спиновых экситонов измерялось лишь косвенно. В нашем исследовании мы успешно подготовили неравновесную спиновую систему, после чего применили методику измерения времени разрешенного резонансного релеевского рассеяния (PPP), дающую возможность непосредственно измерить

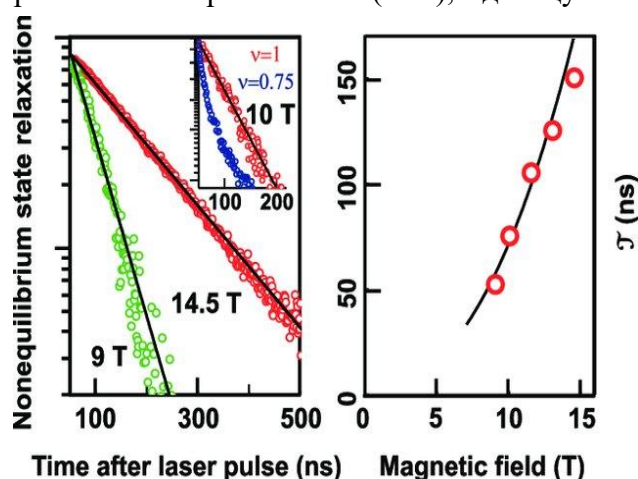


Рис. 1. (Слева) Интенсивность сигнала PPP от времени после импульса лазера, для магнитного поля 9 и 14.5 Т.

(Справа) Зависимость времени релаксации от магнитного поля.

Сплошная линия – теоретический расчет.

спиновую динамику на факторе заполнения 1, измеряя изменение заполненности спиновых подуровней нулевого уровня Ландау. Измеренные времена (от 50 до 150 нс), оказались по крайней мере на порядок длиннее, результатов предыдущих экспериментов. При этом время спиновой релаксации оказалось не зависящим от температуры. Было показано, что экспериментальные данные соответствуют механизму релаксации, в котором основной вклад вносит спин-экситонная аннигиляция, обусловленная спин-орбитальным взаимодействием и случайным потенциалом. Кроме того, большие времена релаксации, 100-150 нс, дают возможность исследовать возможное конденсатное состояние неравновесных спинэкситонов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys.76, 323(2004).
- [2] B. W. Alphenaar, H. O. Müller, and K. Tsukagoshi, Phys. Rev.Lett.81, 5628(1998).

Время-разрешённое керровское вращение, как метод исследования спиновых коллективных состояний в 2ДЭС

А.С.Журавлев*

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

**e-mail: and.zhur@gmail.com*

Исследования спиновой степени свободы в двумерных электронных системах (2ДЭС) приобретает особую значимость в связи с недавними работами по обнаружению дробных спиновых состояний, не являющимися Лафлиновскими жидкостями, и введения понятия «локальной несжимаемости» электронной системы вследствие формирования спиновых текстур в основном состоянии [1]. Важный шаг в изучении свойств частично поляризованных по спину 2ДЭС связан с попыткой прямого измерения спиновой жёсткости коллектива электронных спинов с помощью методики время-разрешённого керровского вращения. Время затухания керровского сигнала, при низких температурах, определяется пространственными флуктуациями эффективного g -фактора электронов. В представленной работе экспериментально исследуется структура сигнала керровского вращения от 2ДЭС в квантующем магнитном поле и показывается, что в полном согласии с микроскопической теорией

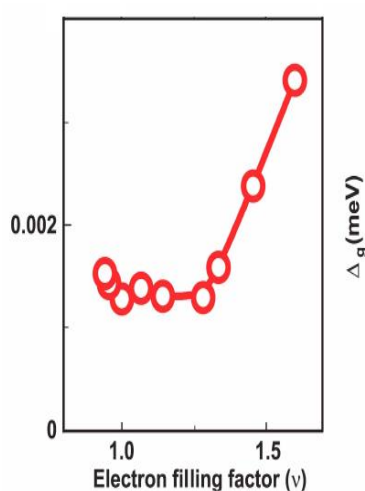


Рис. 1. Зависимость амплитуды флуктуаций эффективного магнитного поля от фактора заполнения.

[2] затухание коллективной спиновой прецессии 2ДЭС может не иметь экспоненциального или линейного вида. Получена зависимость амплитуды керровского сигнала от времени не только на целочисленном факторе заполнения, но и в его окрестности, где ожидается существование спин-текстурной жидкости. Получены оценки на амплитуду флуктуаций магнитного поля, действующего на отдельные спины, а также на корреляционную длину этих флуктуаций. Получена зависимость изменения величины, характеризующей спиновую жёсткость электронной системы, от фактора заполнения. Минимум в окрестности фактора заполнения 1 может свидетельствовать о формировании спин-текстурной (скирмионной) жидкости. При повышении температуры до 1.5K нелинейный вклад в зависимость амплитуды ларморовских осцилляций от времени и зависимость от фактора заполнения пропадают, что позволяет в

дальнейшем изучить термодинамику коллективных спиновых состояний.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-72-00126.

Литература

- [1] H. Fu, Y. Wu, R. Zhang, J. Sun, P. Shan, P. Wang, Z. Zhu, L. N. Pfeiffer, K. W. West, H. Liu, X. C. Xie, and X. Lin, Nature Communications 10, 13 10.1038/s41467-019-12245-y (2019).
- [2] S. Dickmann, J. Phys.: Condens. Matter 32, 015603 (2020).

Экспериментальное исследование влияния граничных условий на поведение одномерных плазменных возбуждений в полосках двумерных электронов

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

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

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

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

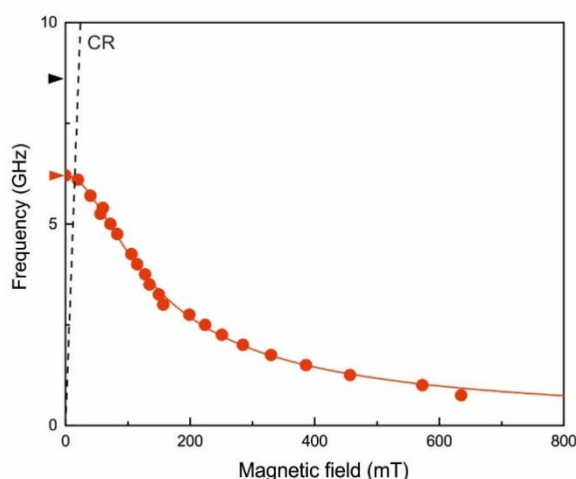


Рис. 1. Магнитодисперсионная зависимость 1D плазменного возбуждения, измеренная в полоске двумерных электронов с размерами $L=1.5$ мм и $W=0.1$ мм без каких-либо металлических контактов. Концентрация двумерных электронов $n=2.0 \cdot 10^{11}$ см⁻². Красная кривая – подгонка теоретической зависимости. Красный и черный маркеры – частота плазмона в нулевом магнитном поле, измеренная экспериментально, и полученная теоретически [1,2], соответственно.

Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах (ДЭС) исследуются как теоретически, так и экспериментально на протяжении более чем 40 лет. В таких структурах помимо двумерных (2D) можно наблюдать также и одномерные (1D) плазменные возбуждения. В частности, используя квазиодномерные структуры, такие как полоски двумерных электронов с большим отношением длины к ширине, можно возбуждать и исследовать 1D плазмоны. Их дисперсионная зависимость имеет линейный характер с логарифмической поправкой, существенной только в области малых волновых векторов.

Помимо геометрических параметров системы, диэлектрического окружения и концентрации двумерных электронов, существует еще один аспект, влияющий на частоту 1D плазмонов. Экспериментально установлено, что граничные условия на концах полоски существенным образом влияют на частоту 1D плазменных

возбуждений. Например, частота 1D плазмона в нулевом магнитном поле для случая полоски, имеющей металлические контакты с двух сторон [2], заметно отличается от случаев как несимметричной полоски двумерных электронов, имеющей контакт только с одного конца [3], так и от полоски без каких-либо металлических контактов (Рис. 1).

Таким образом, экспериментально установлено, что для одного и того же образца в форме полоски путем выбора определенных граничных условий, задаваемых на практике с помощью металлических контактов, можно изменять свойства 1D плазменных возбуждений. В частности, можно менять частоту 1D плазмона.

Литература

- [1] Das Sarma and W. Y. Lai, Phys. Rev. B 32, 1401 (1985).
- [2] I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. A. Kovalskii, S. I. Gubarev, K. von Klitzing, W. Wegscheider, Phys. Rev. B 72, 161317 (2005).
- [3] В. М. Муравьев, А. А. Фортунатов, А. А. Дремин, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 92, 513 (2010).

Терагерцовое и субтерагерцовое смешивание на основе нелинейного плазмонного отклика полоски двумерных электронов с неоднородностью

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

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

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

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

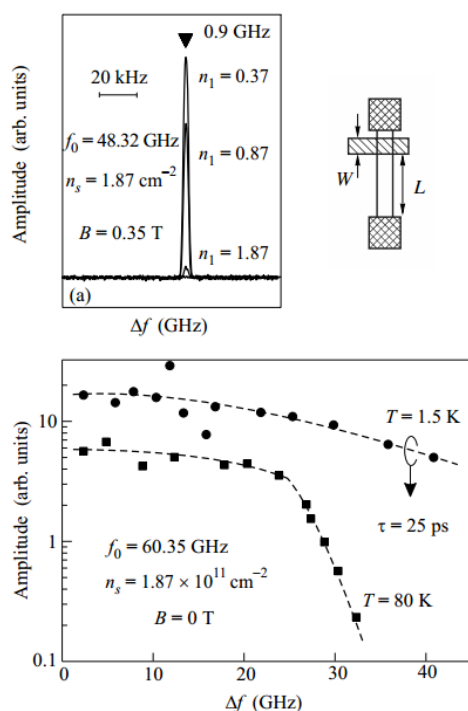


Рис. 1. Сверху слева – отклик исследуемой системы на разностной частоте для различных значений электронной плотности под затвором. Сверху справа – схематический вид ДЭС в форме полоски с контактами на концах и затвором. Снизу – зависимость амплитуды отклика системы от разностной частоты для указанных температур. Из работы [1].

отклика возрастает на два порядка при увеличении неоднородности электронной плотности в подзатворной области (Рис. 1).

Таким образом, было экспериментально установлено, что двумерная электронная система может выступать в качестве смесителя субтерагерцового излучения. Нелинейный отклик такой системы связан со встроенным дефектом. Представленная система обладает рекордным быстродействием со временем отклика не более 25 пс.

Литература

- [1] В. М. Муравьев, И. В. Кукушкин, Ю. Смет, К. фон Клитцинг, Письма в ЖЭТФ 90, 216 (2009).

Терагерцовое и субтерагерцовое электромагнитное излучение имеет ряд уникальных и привлекательных свойств как для фундаментальных научных, так и для прикладных задач. В частности, многие материалы, непрозрачные в видимом диапазоне, пропускают терагерцовое излучение. В то же время, оно не обладает вредным для человека ионизирующим действием. Однако эксплуатация данного диапазона электромагнитных волн сопряжена с рядом технологических трудностей. По этой причине особую значимость имеет исследование новых физических подходов и концепций, которые могут быть применены для работы с данным диапазоном.

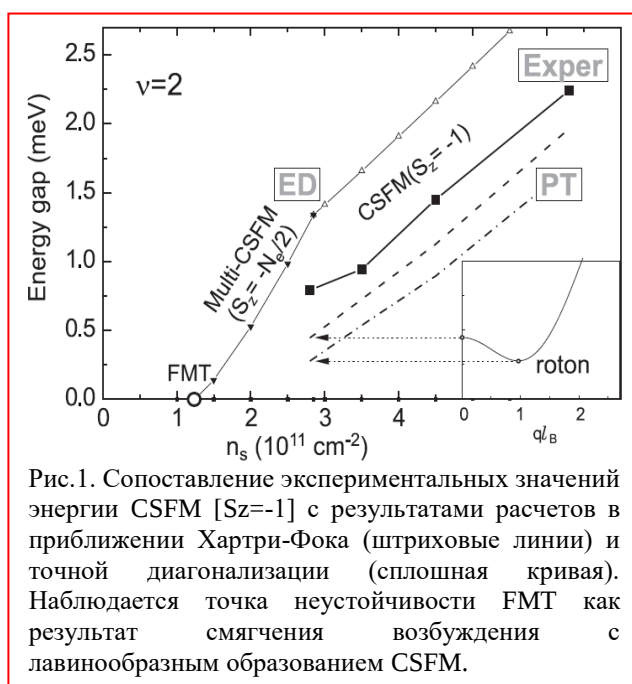
В частности, интерес представляет создание гетеродинных детекторов, эффективно работающих для миллиметрового и субмиллиметрового излучения. В качестве элемента, служащего для смешивания излучения, в таких детекторах может быть использована двумерная электронная система (ДЭС) с дефектом. В работе [1] исследовалась ДЭС в форме полоски с неоднородностью плотности двумерных электронов, реализуемой с помощью подачи напряжения на затвор. В работе было продемонстрировано, что в такой системе наблюдается нелинейный отклик на разностной частоте, связанный с плазменными возбуждениями в ДЭС. Магнитура данного

Формирование ферромагнитной фазы при четных факторах заполнения в сильновзаимодействующих ДЭС на основе ZnO

Б.Д.Кайсин*

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

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



Проявление ферромагнитной неустойчивости при четных факторах заполнения в сильновзаимодействующих ДЭС вызвано конкуренцией ключевых энергетических вкладов, кулоновского и кинетического. Этот эффект наблюдался в серии магнитотранспортных экспериментов как пересечение смежных спиновых подуровней последовательных уровней Ландау [1, 2]. В магнитооптических экспериментах удается извлечь информации об энергетическом спектре системы. В частности, удалось наблюдать диапазоны параметров системы, отвечающие ферромагнитному и парамагнитному упорядочению в

окрестности четных факторов заполнения [3]. Настоящая работа посвящена объяснению данного перехода. Было показано, что его формирование является следствием неустойчивости парамагнитной фазы в условиях значительного смягчения нижайшего по энергии коллективного возбуждения. Для этого, методом неупругого рассеяния света, были проведены исследования кулоновских корреляций на нижайших по энергии коллективных возбуждениях – циклотронные спин-флип магнитоэкситоны (CSFM), при парамагнитном факторе заполнения 2. Данные возбуждения представляют собой переход между двумя уровнями Ландау с переворотом спина. Энергия CSFM была измерена как функция концентрации на серии образцов ZnO/MgZnO (Рис. 1). Показано что в диапазоне концентраций, соответствующих параметру взаимодействия $r_s = 5 - 7$, совместный вклад кулоновской и зеемановской энергий приводит к «смягчению» CSFM, которое вызывает спонтанное переключение спиновой конфигурации на факторе заполнения 2 с парамагнитной на ферромагнитную. Также были проведены теоретические оценки корреляционного вклада в энергию CSFM, которые находятся в согласии с экспериментом и проясняют механизм фазового перехода (Рис. 1).

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] A. Tsukazaki, M. Kawasaki et al., Phys. Rev. B 78, 233308 (2008).
- [2] Y. Kozuka, M. Kawasaki et al., Phys. Rev. B 85, 075302 (2012).
- [3] A. B. Vankov, B. D. Kaysin, I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 96, 235401 (2017).

Спиновая деполяризация холловского ферромагнетика вблизи $\nu = 1$ в ДЭС на основе ZnO

Б.Д.Кайсин*

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

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

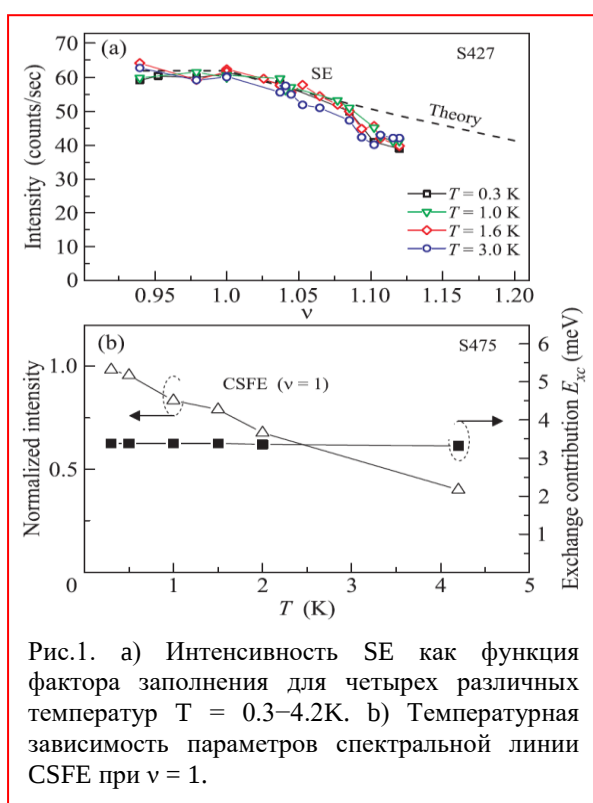


Рис.1. а) Интенсивность SE как функция фактора заполнения для четырех различных температур $T = 0.3\text{--}4.2\text{ K}$. б) Температурная зависимость параметров спектральной линии CSFE при $\nu = 1$.

При единичном факторе заполнения ДЭС представляет собой квантово холловский ферромагнетик – простейшее модельное состояние, имеющее минимальное число внутренних степеней свободы и полную спиновую поляризацию. Простейшее элементарное возбуждение в таком состоянии представляет собой спиновой экситон (SE – spin exciton – спин-флип процесс в пределах нижайшего уровня Ландау) с минимальной щелью в длинноволновом пределе, определяемой Зеемановской энергией. Вероятность возбуждения спиновых экситонов напрямую зависит от степени спиновой поляризации системы [1] и достигает максимума при ферромагнитном упорядочении.

В сильновзаимодействующих двумерных электронных системах на основе ZnO изучено поведение степени спиновой поляризации и величины удельной

обменной энергии вблизи состояния холловского ферромагнетика $\nu = 1$. Экспериментальное зондирование осуществлялось методом неупругого рассеяния света на коллективных возбуждениях электронной системы – спиновых экситонах и циклотронных спин-флип экситонах. Интенсивность спектральной линии спинового экситона служила индикатором спиновой поляризации системы, а энергия циклотронного спин-флип экситона – мерой удельной обменной энергии на нижнем уровне Ландау. Обнаружено, что при отклонении фактора заполнения в сторону $\nu < 1$ деполяризации не наблюдается, а $\nu > 1$ система деполяризуется по одночастичному сценарию (Рис.1). Величина удельной обменной энергии снижается по обе стороны от $\nu = 1$. Показано, что локальный ферромагнитный порядок при $\nu = 1$ сохраняется и при повышении температуры до 4.2 K, что несколько ниже Зеемановской энергии.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] А.Б. Ваньков, Б.Д. Кайсин, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 107, 110 (2018).

Портативный газоанализатор на основе волоконно-усиленного рамановского рассеяния

В.Е.Кирпичев*, М.Н.Ханнанов

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

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

Онлайн-мониторинг газового состава в экологии, промышленности, медицине и других областях очень важен для решения многих задач. С точки зрения экологии важное значение имеют различные примеси газообразных и капельно-жидких частиц, попадающих в атмосферу из локальных источников, в том числе вблизи промышленных объектов. Из-за сложного компонентного состава атмосферных газов и низких критических концентраций газовых маркеров, газовый анализ требует высокой селективности и чувствительности метода. Колебательная спектроскопия является одним из ключевых методов фундаментальных молекулярных исследований. Это также мощный метод для количественного анализа.

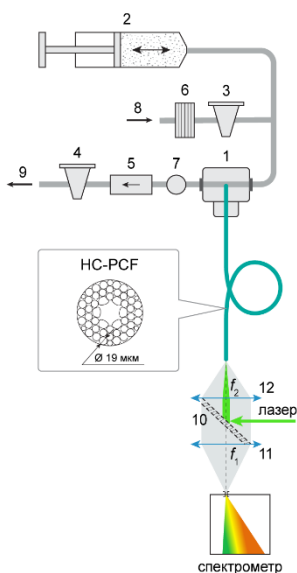
Наиболее практичным в использовании может оказаться рамановский детектор с усилением чувствительности за счет наращивания длины формирования сигнала рассеяния. Эффективная геометрия рассеяния света на газе может быть реализована в полом световоде, заполненном газом, по которому распространяется накачивающее лазерное излучение. Длина формирования оптического сигнала в такой реализации ограничивается только параметрами затухания на длинах накачивающей и рассеянной волн света. Для появившихся сравнительно недавно полых фотонно-кристаллических световодов [1, 2] она может достигать 50-100 метров, с многообещающим увеличением сигнала относительно однопроходной конфигурации измерения в открытой кювете.

На рисунке представлена схема разработанного газоанализатора на основе портативного рамановского спектрометра, полого фотонно-кристаллического оптоволоконного кабеля и газовой обвязки. Экспериментальная установка для измерения спектров неупругого рассеяния на газовых смесях создана на основе портативного Рамановского спектрометра EnSpectr R532, реализованного в конфигурации Черни-Тернера со светосилой $A=1/6$, разрешением 4 см^{-1} , длиной волны лазерного источника 532 нм и выходной мощностью $\sim 15\text{ мВт}$. Оптическая накачка и сбор сигнала осуществлялись при фокусировке лазерного луча в центр полой фотонно-кристаллической жилы с торца световода. Заведение накачивающего лазерного излучения в оптическую систему осуществлялось при помощи дихроического зеркала (10), отражающего свет на длине волны лазера и пропускающего свет более длинных волн (стоксову компоненту рамановского рассеяния).

Реализованная конструкция позволила более чем на два порядка повысить уровень сигнала неупругого рассеяния света на различных газовых смесях, по сравнению с сигналом с открытого объема газа.

[1] S. Hanf, R. Keiner, D. Yan, J. Popp, and T. Frosch, *Anal. Chem.* 86, 5278 (2014).

[2] K. K. Chow, M. Short, S. Lam, A. McWilliams, etc *Med. Phys.* 41, 092701 (2014).

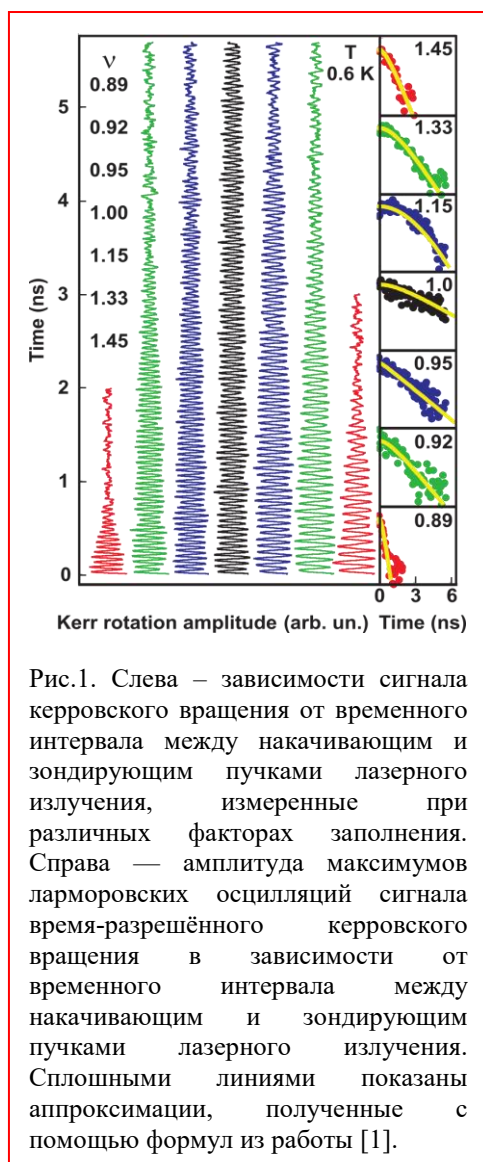


Особенности когерентной спиновой динамики двумерного электронного газа в режиме Холловского ферромагнетика

А.В.Ларионов*, Л.В.Кулик

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

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



С помощью время-разрешенного магнито-оптического эффекта Керра изучена когерентная спиновая динамика двумерных электронов в 17 нм GaAs квантовой яме (КЯ) в режиме Холловского ферромагнетика. Для фотовозбуждения использовался фемтосекундный титан-сапфировый лазер, перестраиваемый по длине волны, совместно с формирователем длительности импульсов. Образец помещался в криостат с соленоидом, создающим магнитное поле до 10 Тл и содержащим вставку для конденсации изотопа гелия ^3He . Конструкция вставки позволяла плавно менять температуру в диапазоне от 0.6 К до 15 К. Непосредственный держатель образца содержал оптическое окно, через которое заводилось лазерное фотовозбуждение внутрь криостата и собирался полезный сигнал. Исследуемый образец монтировался в держателе таким образом, что наклон плоскости квантовой ямы к направлению вектора магнитной индукции составлял 45 градусов.

Был проведен анализ полученных экспериментальных данных (см. рис.1) с использованием теоретической модели, развитой в работе [1]. Также была сделана попытка распространить результаты этой теоретической работы на область факторов заполнения, формально теорией не описываемую, и получить оценки на амплитуду флуктуаций магнитного поля, действующего на отдельные спины, а также

на корреляционную длину этих флуктуаций. Экспериментальные оценки находятся в разумном согласии с ожидаемыми значениями. Экспериментальные результаты дают основание полагать, что методика время-разрешённого керровского вращения для коллективных спиновых состояний 2ДЭС может оказаться столь же информативной, что и магнитотранспортные методики для исследования коллективных зарядовых состояний 2ДЭС.

Литература

[1] S.B Dickmann, J. Phys.: Condensed Matter 32, 015603 (2020).

Квантовые генераторы случайных чисел на основе процесса фотодетектирования: влияние внешних параметров и поиск динамических закономерностей

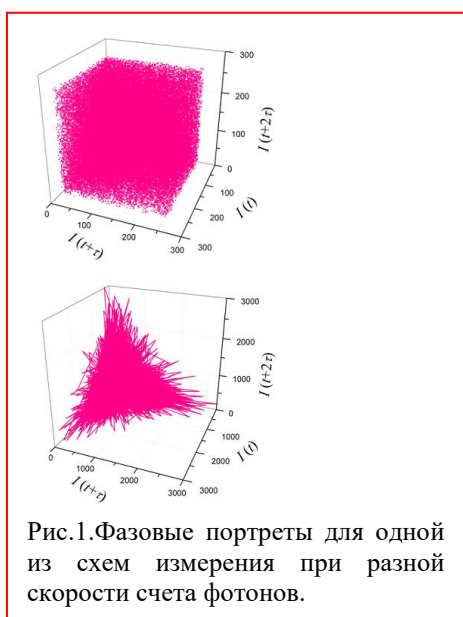
М.В.Лебедев^{1,2*}, А.Л.Парахонский¹, А.В.Соловьев², О.В.Мисочко^{1,2}, А.И.Овян², Г.Б.Лесовик^{2,3}

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

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

³Terra Quantum AG, St. Gallerstrasse 16A, 9400 Rorschach, Switzerland

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



Проанализированы две различные схемы квантовых генераторов случайных чисел, использующих детектирование фотонов – схема, основанная на измерении временных интервалов между последовательными фотоотсчётами, и схема с дискретными интервалами измерения, реализованные экспериментально в МФТИ и ИФТТ. Рассмотрено влияние изменения внешних параметров на работу этих схем, определяющее их надёжность и потенциальную защищённость от нежелательных внешних воздействий. Качество полученных случайных последовательностей изучалось методами корреляционного анализа и прохождением набора стандартных тестов. Предложен новый подход к анализу случайной последовательности, основанный на поиске динамических закономерностей, и установлена его связь с методом Марсальи [1]. В отличие от идеи

Марсальи, использующей метод последовательных координат $(x_1, x_2, x_3), (x_4, x_5, x_6), \dots$ единичного гиперкуба для представления случайной последовательности, метод фазового пространства [2] предлагает построение траекторий по координатам лагового пространства $(x_1, x_4, x_7), (x_2, x_5, x_8), \dots$ значений ряда I . Было обнаружено, что скорость счета фотонов отражается на фазовом портрете: при медленном счете мы имеем бесструктурный куб, а при более быстром – пирамиду (рис.1). Такой подход дает дополнительную информацию при исследовании свойств случайности, т. к. включает в себя несколько независимых и взаимодополняющих критериев случайности одновременно (корреляционная размерность, метрическая энтропия и т. д.). Например, линейный характер корреляционной размерности аттрактора отражает либо стохастический процесс, либо переходный, имеющий большую размерность. Для разделения этих вкладов может быть использована энтропия Колмогорова-Синая h_{KS} (или метрическая энтропия), которая определяет среднюю скорость разбегания траекторий на аттракторе. Если h_{KS} неограниченно возрастает, мы имеем дело со стохастическим процессом.

Литература

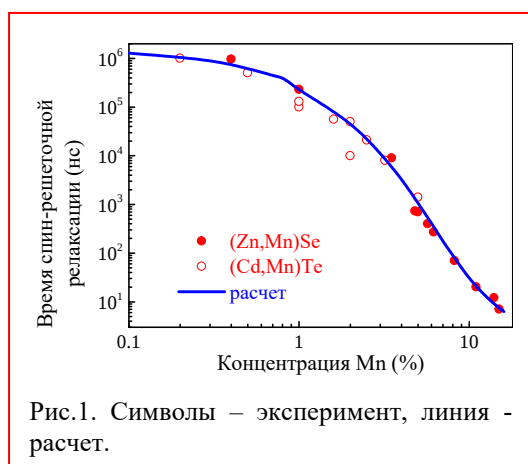
- [1] G. Marsaglia, Proc. Nat. Acad. Sci., 60, 25-28 (1968).
- [2] N.H. Packard, J.P. Crutchfield, J.D. Farmer, and R.S. Shaw, Phys. Rev. Lett. 45 (9), 712 (1980).

Модель спин-решеточной релаксации в полумагнитных A^2B^6 полупроводниках

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

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

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



Одним из самых удивительных экспериментальных результатов исследований полумагнитных A^2B^6 полупроводников последних лет является чрезвычайно резкая зависимость скорости спин-решеточной релаксации при изменении концентрации магнитной примеси. Изменение концентрации от 0.4% до 15% вызывает уменьшение времени спин-решеточной релаксации на более, чем пять порядков величины (рис. 1).

Была развита феноменологическая компьютерная модель, которая позволила определить вероятности обнаружить ион

марганца в магнитных кластерах различного размера, времена распространения спиновых возбуждений к этим кластерам в полумагнитных полупроводниках с различным содержанием магнитных примесей и оценить времена релаксации намагниченности в таких кластерах.

На первом этапе вычислений ГЦК решетка полумагнитных полупроводников типа (Zn,Mn)Se или (Cd,Mn)Te, размером до 32 миллионов катионных позиций, случайно заполнялась примесными атомами Mn с нужной концентрацией, что позволило определить вероятности обнаружить их в магнитных кластерах различного размера. Далее, зная измеренный экспериментально коэффициент спиновой диффузии, определялось среднее время миграции спинового возбуждения от одиночных ионов до кластеров различного размера.

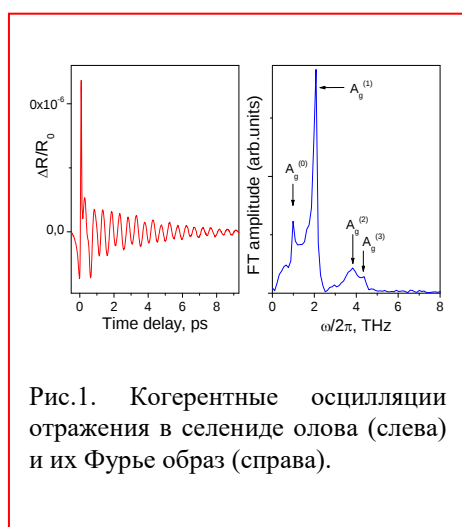
По мере увеличения концентрации ионов Mn все большее их число входит в кластеры больших размеров, а размеры кластеров, до которых время спиновой диффузии возбуждения меньше, чем время спин-решеточной релаксации, увеличиваются. Это определяет важную роль таких кластеров больших размеров в процессе спин-решеточной релаксации магнитной подсистемы в целом при высоких (>2%) концентрациях Mn в полумагнитных полупроводниках. В предположении, что спиновая диффузия возбуждений до кластеров является самым быстрым процессом, обратное время спин-решеточной релаксации будет равно сумме вероятностей нахождения магнитного иона в кластере определенного размера деленных на время спиновой релаксации этого кластера. При этом при различных концентрациях магнитных примесей основной вклад в спин-решеточную релаксацию системы в целом будут давать кластеры определенных различных размеров. Это позволяет оценить времена спиновой релаксации отдельных кластеров магнитных ионов различного размера от ~3 нс для кластеров размером 11 атомов и больше до 1.5 мс для одиночных ионов Mn^{2+} и описать зависимость времени спин-решеточной релаксации от концентрации Mn, наблюдаемую на эксперименте. На рис. 1 приведен пример такого описания. Видно, что может быть достигнуто неплохое согласие расчетов с экспериментом.

Нетермическое смягчение частот когерентных фононов в кристаллах с пайерлсовскими искажениями

О.В.Мисочко*

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

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



Сверхбыстрая динамическая спектроскопия за последнее десятилетие выявила новый класс физических процессов, в которых баллистическое движение атомов играет ключевую роль. Эти процессы кардинально отличаются от процессов, для которых случайное, диффузионное движение атомов определяет скорости превращения. Типичным примером этих новых процессов является сверхбыстрое, нетермическое плавление и предшествующее ему смягчение фононных частот, которое возникает в результате сильного изменения межатомных сил из-за быстрого возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости (холодная решетка, горячие электроны). В результате этого атомы приводятся в когерентное

движение и приобретают достаточную кинетическую энергию для того, чтобы изменить и даже дестабилизировать решетку за времена (десятки фемтосекунд) более короткие чем времена, определяемые электрон-фононным взаимодействием (десятки пикосекунд), которые контролируют конвертацию электронной энергии в энергию решеточных движений. Детальное исследование полносимметричных когерентных фононов полуметаллов Bi и Sb, а также полупроводника SnSe (см. Рис.1) позволило выяснить роль электронной подсистемы в смягчении частот полносимметричных когерентных фононов при росте степени возбуждения. Это было реализовано при помощи когерентного контроля, который позволил выделить вклад ангармонизма решетки, позволяя независимо контролировать степень возбуждения электронной подсистемы (плотность фотоиндуцированных носителей или неравновесная электронная температура) и амплитуду решеточных смещений. Показано, что зависимости частот когерентных фононов в полуметаллах и полупроводнике от плотности энергии возбуждения функционально совпадают, демонстрируя сублинейную зависимость. Однако отклонения от линейного режима в SnSe начинаются при плотности энергии импульса возбуждения на один-два порядка меньших чем в полуметалле. Сделана попытка объяснить этот факт различием величины и характера пайерлсовских искажений, существующих в данных кристаллах. Работа поддержана грантом 20-02-00231 РФФИ.

Литература

- [1] Мисочко О.В. Зависимость амплитуды когерентных фононов сурьмы от длительности возбуждающего лазерного импульса, ЖЭТФ 337, 150(2) (2016).
- [2] Misochko O.V., Lebedev M.V. Coherent lattice dynamics in opaque crystals: Testing the adequacy of two-tensor model, Physical Review B 94 (18), 184307 (2016).

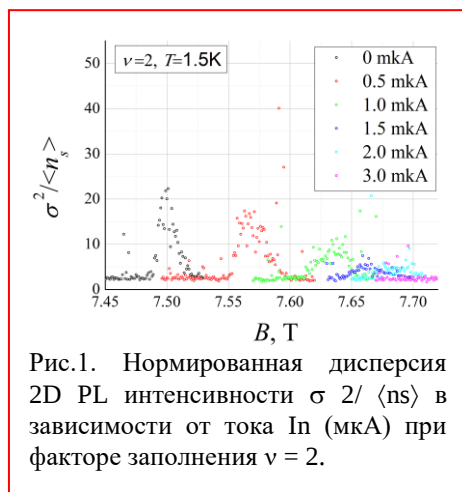
Влияние контактных и краевых областей электронной 2D-системы на гигантские оптические флуктуации в режиме квантового эффекта Холла

А.Л.Парахонский^{1*}, М.В.Лебедев^{1,2}, А.А.Дремин¹, В.В.Соловьев¹, И.В.Кукушкин¹

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

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

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



Исследовалось влияние контактных и краевых областей двумерной (2D) электронной системы, в которой имеется градиент потенциала, на гигантские оптические флуктуации (ГОФ) [1] в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) (фактор заполнения $\nu = 2$). При подаче тока I_n на холловскую структуру, сформированную на поверхности образца с одиночной GaAs/AlGaAs квантовой ямой, флуктуации интенсивности фотолуминесценции двумерных электронов (2D PL) уменьшаются. Зависимость нормированной дисперсии 2D PL интенсивности от тока показана на рисунке. При увеличении тока профиль дисперсии шума сдвигается в сторону больших магнитных полей B , что связано с ростом электронной плотности n_s . При токе $I_n \sim n_s e U_n = 3.0$ мкА флуктуации ГОФ полностью исчезают. Разность потенциалов U_n , соответствующая этому значению I_n , имеет порядок циклотронной энергии $\hbar\omega_c/e$. Обнаруженный эффект, по-видимому, свидетельствует о постепенном увеличении степени экранирования электронной жидкостью краевых состояний, т. к. экранирование существенным образом влияет на структуру электронной плотности вблизи границы [2], и изменении ее состояния в объеме (фактор заполнения $\nu = 2$ наблюдается при больших значениях B). При полученном значении тока $I_n = 3.0$ мкА происходит полная экранировка электронами краевого потенциала, в результате которой электронная жидкость переходит из несжимаемого однородного состояния (Холловский диэлектрик) в сжимаемое.

Литература

- [1] A.L. Parakhonsky, M.V. Lebedev, A.A. Dremin, I.V. Kukushkin, A highly ordered radiative state in a 2D electron system, Chapter in book: Research Advances in Quantum Dynamics, Edition: University of Texas, Edinburg, TX, Chapter: 5, Publisher: InTech, Editors: Paul Bracken, 93-109 (2016).
- [2] D.B. Chklovskii, B.I. Shklovskii, L.I. Glazman, Electrostatics of edge channels, Phys. Rev. B, 46, 4026 (1992).

Создание LC-контура на основе двумерных электронных систем

Н.Д.Семенов*, И.В.Андреев, В.М.Муравьев*ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: nikolai.semenov@issp.ac.ru*

Современная технология изготовления микроструктур позволяет создавать устройства на основе метаматериалов, структурные компоненты которых играют роль резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Эти принципы были успешно применены в оптическом [1] и инфракрасном [2, 3] диапазонах. В микроволновом случае можно использовать полупроводниковые гетероструктуры с двумерными электронными системами (ДЭС), где инерция коллективно движущихся электронов в плазменной волне приводит к появлению кинетической индуктивности немагнитного характера.

В данной работе удалось успешно реализовать резонансный LC-контур на чипе. Для этого были использованы квантовые ямы высокоподвижных гетероструктур GaAs/AlGaAs с прямоугольными контактами на поверхности кристалла. В такой схеме фрагмент ДЭС действует как кинетическая индуктивность, расположенная между двумя боковыми металлическими накладными электродами, образующими пластины конденсатора.

В эксперименте были исследованы спектры микроволнового поглощения ДЭС и показано, что наряду с фундаментальной плазменной модой также наблюдается дополнительный LC-резонанс, частота которого определяется кинетической индуктивностью и латеральной емкостью электродов. Изменяя концентрацию электронов и / или размер контактов, можно перестраивать резонансную частоту в широком диапазоне значений. Такой подход обеспечивает основу для создания непосредственно на чипе различных микроволновых метаматериалов и компонентов, таких как генераторы или детекторы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-02-00753).

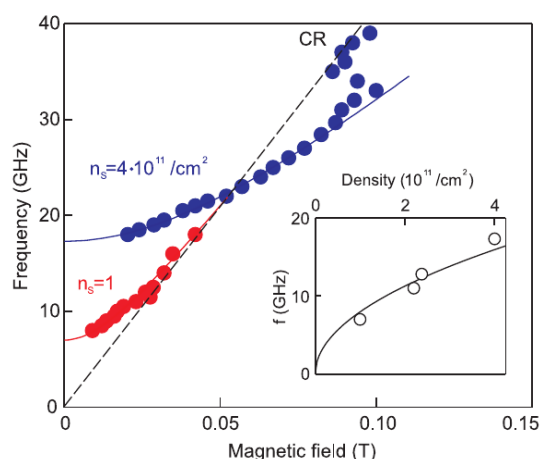


Рис. 1. Магнитодисперсия плазмона, индуцированного близостью металла, для образцов с электронными концентрациями $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (синие точки) и $1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (красные точки). На вставке изображена зависимость резонансной частоты LC-контура от электронной концентрации. Непрерывной линией показан корневой характер зависимости.

Литература

- [1] N. Engheta, Science 317, 1698 (2007).
- [2] Y. Sun, B. Edwards, A. Alu, and N. Engheta, Nat. Mater. 11, 208 (2012).
- [3] H. Caglayan et al., Phys. Rev. Lett. 111, 073904 (2013).

О быстродействии терагерцовых плазмонных детекторов

Н.Д.Семенов*, Г.Э.Цыдынжапов, В.М.Муравьев*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: nikolai.semenov@phystech.edu*

Совершенствование терагерцовых приемников является принципиальным шагом для развития систем безопасности и медицинской диагностики. Актуальной является задача создания быстрых полупроводниковых детекторов для субмиллиметровых длин волн. Одним из перспективных физических подходов к решению этой проблемы является преобразование электромагнитного излучения в переменный потенциал релятивистской плазменной волны, распространяющейся и выпрямляемой в двумерной электронной системе (ДЭС) [1-3]. Резонансный плазмонный фотоотклик в таких структурах наблюдается вплоть до комнатной температуры. В настоящей работе было измерено время этого отклика с помощью двух независимых методик.

Исследования проводились на структурах с пятью GaAs квантовыми ямами шириной по 20 нм. На каждой из них помощью фотолитографии была изготовлена меза, представляющая собой полосу двумерных электронов с двумя Au/Ge контактами на концах и металлическим затвором, напыленным на поверхность кристалла. Такая структура работает как широкополосная антенна, формирующая отклик двумерной электронной системы на терагерцовое излучение.

Эксперименты проводились двумя методиками: с разрешением по времени и гетеродинной. Прямые измерения с разрешением по времени показали время отклика детектора $\tau_t < 150$ пс. Более простой гетеродинной методикой было получено время отклика $\tau_m = (110 \pm 6)$ пс. Эти результаты доказывают возможность использования разработанного терагерцового детектора в качестве узла высокочастотных телекоммуникационных систем нового поколения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТТ РАН.

Литература

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

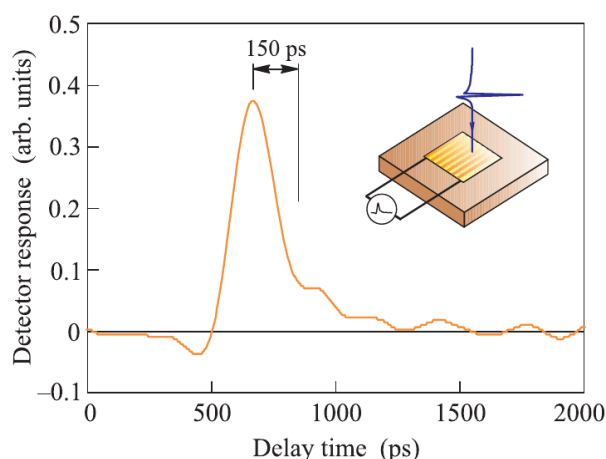


Рис. 1. Временная зависимость фотоотклика плазмонного детектора на импульсное возбуждение с центральной частотой 1 ТГц и длительностью импульса менее 1 пс.

Манипулирование спиновой когерентностью двумерных электронов в GaAs квантовой яме с помощью одномерной латеральной локализации

Э.Степанец-Хуссейн^{1,2*}, А.В.Ларионов², С.В.Егоров²

¹НИУ ВШЭ РАН, 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 20

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

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

В XXI веке экономика мира оказалась полностью зависимой от цифровых технологий. При этом непрерывно растёт спрос на более эффективные методы хранения, обработки и передачи информации. В этой связи набирает актуальность поиск новых технических решений по имплементации дополнительных степеней свободы в полупроводниковых устройствах. Одним из таких решений может стать использование спина электронов в качестве бита информации. В этом случае ключевым параметром является время жизни (релаксации) электронного спина.

Цель данной работы – изучить возможность управления временем спиновой декогеренции двумерных электронов с помощью локализации в одномерных потенциальных ловушках. Ранее уже проводились исследования, направленные на изучение спиновой динамики электронов, помещённых в массив специфических потенциальных ям, регулярно расположенных в плоскости GaAs квантовой ямы [1], [2]. Нами исследовалась выращенная методом МВЕ GaAs/AlGaAs полупроводниковая гетероструктура с 20 нм GaAs квантовой ямой, содержащей двумерный электронный газ с подвижностью $\mu \sim 2 \cdot 10^6 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ и концентрацией квазидвумерных электронов после нанесения маски на уровне $n = 3,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. С помощью электронной литографии на поверхности структуры был создан электрический затвор специальной формы в виде периодических металлических полосок с периодом 400 (b), 500 (c) и 600 (d) нм (рис. 1). Квантовая яма, расположенная на глубине 160 нм от поверхности структуры, служила внутренним электродом. Приложение к квантовой яме электрического поля такой конфигурации создавало потенциальные ямы. Спиновая когерентность электронов изучалась методом измерения время-разрешённого магнито-оптического эффекта Керра. В эксперименте использовалась двойная модуляция пучка зондирования и пучка накачки, позволяющая эффективно подавлять паразитный сигнал, создаваемый рассеянным от металлического затвора светом накачки. Были получены зависимости керровского сигнала от приложенного электрического смещения (от 0 до 1 В), от магнитного поля в геометрии Фойгта, и температурная зависимость времени спиновой дефазировки. Экспериментально обнаружен рост времени спиновой релаксации двумерных электронов на порядок в одномерных латеральных потенциальных ловушках при приложении отрицательного смещения, связанный с локализацией электронов в нашей структуре.

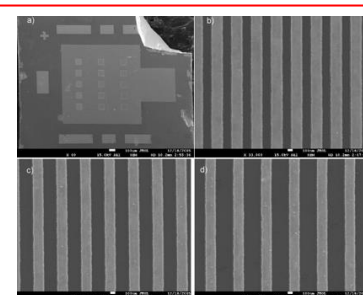


Рис.1. Фотографии образца, полученные на сканирующем электронном микроскопе: а) вид золотой маски на поверхности структуры; период полосок - б) 400 нм; в) 500 нм; г) 600 нм. Размер каждой минизоны с полосками – 80 нм.

Литература

- [1] Р.В. Чербуниин и др., Физика твердого тела 51, 4 (2009).
- [2] А.В. Ларионов, А.В. Секретенко, А.И. Ильин, Письма в ЖЭТФ 93, 5 (2011).

Термализация экситонных поляритонов, резонансно возбуждаемых в GaAs микрорезонаторах

С.Н.Терешко^{1,2*}, А.А.Деменев¹, А.А.Колосветов^{1,2}

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

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

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

Экситонные поляритоны образуются в полупроводниковых микрорезонаторах (МР) вследствие взаимодействия оптической и экситонной мод в режиме сильной экситон-фотонной связи. Благодаря малой эффективной массе, $\sim 10^{-4}m_e$, они демонстрируют квантовые когерентные свойства при относительно низких плотностях поляритонов около 10^{10} см^{-2} и температурах вплоть до комнатной. Изучение конденсации экситонных поляритонов на нижней поляритонной (НП) ветви в условиях межзонного возбуждения показало, что на свойства такого конденсата сильно влияет образующийся экситонный резервуар [1]. Поэтому представляет большой интерес исследование термализации поляритонов в термодинамически неравновесной поляритонной системе в отсутствие экситонного резервуара.

Для получения «чистой» поляритонной системы мы использовали резонансное оптическое возбуждение неравновесного поляритонного газа в широком диапазоне k -векторов ($|k| < 2.5 \text{ мкм}^{-1}$) пикосекундными некогерентными импульсами в пятне диаметром ~ 100 микрон. Резонансное возбуждение создает ряд свободно эволюционирующих поляритонных мод с различными k , которые взаимодействуют и самоорганизуются без помощи экситонного резервуара.

Экспериментально было найдено, что конденсация резонансно возбужденных поляритонов при $T=2 \text{ К}$, в отличие от случая межзонного возбуждения, не происходит даже при временах $>300 \text{ пс}$. Длина когерентности в поляритонной системе при $t=250 \text{ пс}$ не превышает $L_c=5 \text{ мкм}$. При повышении температуры образца до 40 К релаксация поляритонов ускоряется, и величина L_c при $t=250 \text{ пс}$ достигает 12 мкм . При этом наблюдается изменение средней энергии поляритонов $\langle E \rangle$. Основными механизмами термализации поляритонов в поляритонной системе в отсутствие экситонного резервуара при низких температурах являются поляритон-поляритонное рассеяние, сохраняющее полную энергию в системе, и рассеяние поляритонов на акустических фононах, ведущее к изменению $\langle E \rangle$. Измеренные зависимости $\langle E \rangle(t)$ при $T=2$ и 40 К при резонансном возбуждении поляритонов со средней энергией $0.4 - 0.8 \text{ мэВ}$ (рис. 1) однозначно свидетельствуют о повышении $\langle E \rangle$ при $T=40 \text{ К}$ и ее понижении при 2 К и позволяют по динамике этой величины определить роль рассеяния поляритонов на фононах в термализации поляритонов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

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

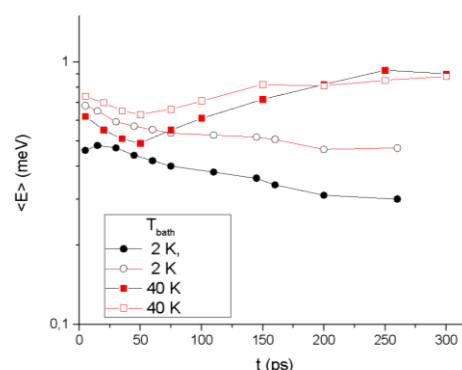


Рис. 1 Зависимость средней энергии поляритонов от времени для низкой и высокой температур. Два графика для одной температуры отражают разные условия накачки в k -пространстве.

Зависимость коэффициента усиления SERS от геометрических параметров подложки при инфракрасном возбуждении

В.И.Кукушкин,* Е.Н.Морозова, В.В.Соловьёв, Я.В.Федотова, И.В.Кукушкин

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

*e-mail: kukushvi@mail.ru

В нашей предыдущей работе [1] были продемонстрированы модулированные металл-диэлектрические подложки, принцип работы которых основан на явлении поверхностно усиленного рамановского рассеяния света (SERS), обеспечивающие (при определённых условиях, наложенных на геометрию структуры) усиление сигнала на длине волны лазерного возбуждения $\lambda=1064$ нм вплоть до рекордного значения $2 \cdot 10^8$. Данное исследование посвящено вопросу о том, какова зависимость коэффициента усиления неупругого рассеяния света от таких параметров, как высота диэлектрического столбика h и толщина металлического покрытия t . Объектами исследования являлись термически оксидированные кремниевые подложки размером 5×5 мм² с толщиной окисла 1.2 мкм, в центре которых методами электронной литографии и плазмохимического травления были созданы массивы диэлектрических столбиков, заполняющих площадь 2×2 мм², имеющих квадратное сечение, размер $a=500$ нм и период $p=1000$ нм (оптимальные значения, найденные в работе [1]) с плавным перебором глубины травления h (рис. 1). Обнаружены новые резонансные моды, отвечающие отношениям глубины травления к длине волны лазерного возбуждения $1/4$, $1/2$ и $3/4$ (рис. 2). Установлено, что для серебряного покрытия максимум коэффициента усиления SERS достигается при толщине $t=80$ нм.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант РНФ-19-72-30003).

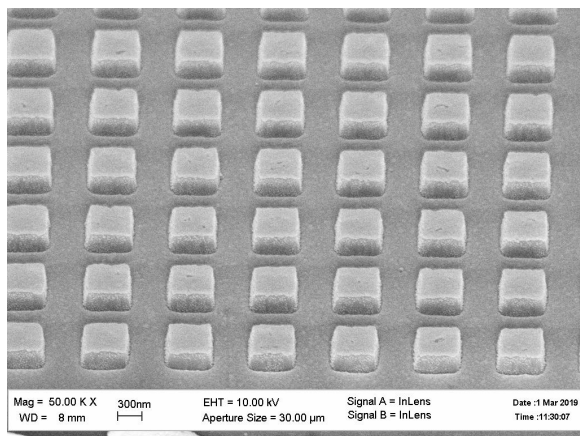


Рис.1. Фотография части массива столбиков из SiO₂, покрытых металлическим слоем, созданных на оксидированной кремниевой подложке, полученная на электронном микроскопе.

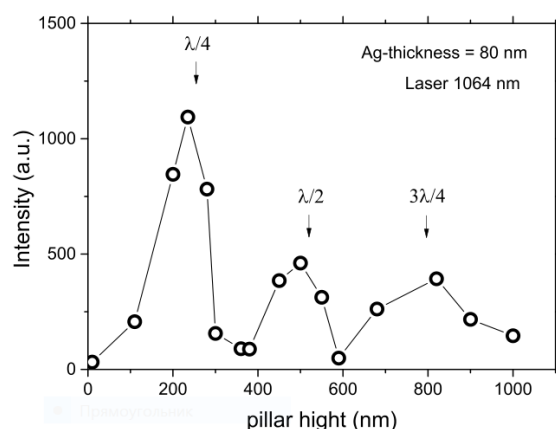


Рис.2. Зависимость интенсивности сигнала рамановского рассеяния от высоты диэлектрических столбиков.

Литература

- [1] Ya. V. Fedotova, V. I. Kukushkin, V. V. Solov'ev, I. V. Kukushkin, Optics Express, 27, 32578 (2019).

Зависимость от температуры времен релаксации фотовозбужденных дырок в гетероструктурах 2-го типа ZnSe/BeTe

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

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

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

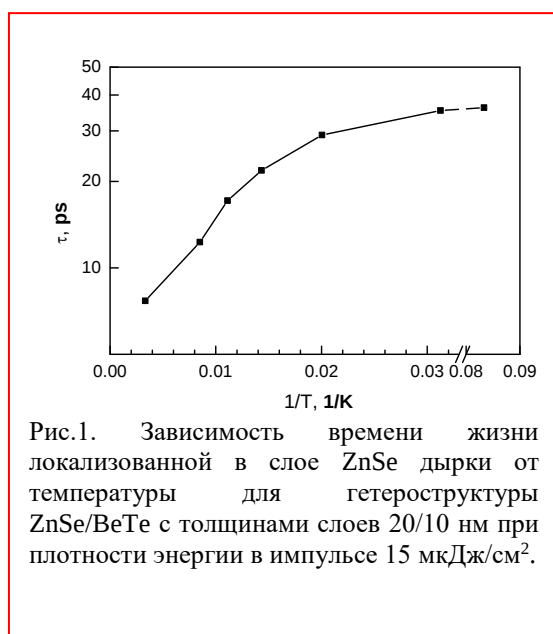


Рис.1. Зависимость времени жизни локализованной в слое ZnSe дырки от температуры для гетероструктуры ZnSe/BeTe с толщинами слоев 20/10 нм при плотности энергии в импульсе 15 мкДж/см².

В гетероструктурах 2-го типа ZnSe/BeTe минимумы потенциальной энергии для электронов и дырок расположены в различных слоях, что приводит к пространственному разделению носителей заряда разного знака. Большая разница ширины запрещенной зоны в слоях ZnSe (2.8 эВ) и BeTe (4.5 эВ) позволяет избирательно генерировать пары оптически возбужденных электронов и дырок в слое ZnSe. В ходе релаксации по энергии электроны остаются в слое ZnSe, тогда как дырки релаксируют в основное состояние в слое BeTe.

При высокой плотности мощности оптического возбуждения пространственное разделение зарядов приводит к увеличению времени жизни дырок в слое ZnSe. Эффект

обусловлен формированием потенциального барьера для дырки, локализованной в слое ZnSe, а также увеличением времени радиационной рекомбинации электрона и дырки в слое ZnSe. Для описания кинетики релаксации фотовозбужденных дырок при гелиевых температурах достаточно рассмотрения волновой функции электрона в основном состоянии в слое ZnSe, дырки в нижайшем надбарьерном состоянии, локализованном в слое ZnSe, а также дырки в основном состоянии в слое BeTe [1,2].

При более высоких температурах необходимо учитывать процессы релаксации электронов и дырок, занимающих уровни размерного квантования с более высокой энергией. В данной работе изучались процессы релаксации фотовозбужденных дырок при температурах в диапазоне от 12 до 300 К.

Электронно-дырочные пары возбуждались в слое ZnSe с помощью 2-й гармоники фемтосекундного Ti:Sa лазера. Фотolumинесценция в области 2.8 эВ регистрировалась с помощью стрик камеры в режиме синхронного сканирования. При фиксированной плотности оптического возбуждения, с ростом температуры наблюдалось уменьшение времени жизни дырки в слое ZnSe (см. рис. 1).

Для описания кинетики релаксации фотовозбужденных дырок были проведены самосогласованные расчеты системы уравнений Шредингера и Пуассона.

Литература

- [1] А.А. Максимов, С.В. Зайцев, Е.В. Филатов, А.В. Ларионов, И.И. Тартаковский, Д.Р. Яковлев, А. Вааг, Письма в ЖЭТФ 88, 587 (2008).
- [2] E.V. Filatov, S.V. Zaitsev, I.I. Tartakovskii, A.A. Maksimov, D.R. Yakovlev, A. Waag, Phys. Stat. Sol. (c) 7, 1533 (2010).

Контролируемое заполнение долин в узких квантовых ямах AlAs

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

За последние полвека полупроводниковая электроника на основе кремния претерпела впечатляющий рост в развитии. Однако дальнейший прогресс в данной области выявил наличие фундаментальных физических ограничений. Вследствие этого идёт активный поиск новых концепций устройств. Спинтроника, к примеру, основывается на оперировании со спином электронов [1]. Долинотроника – относительно новое направление, которое использует долинную степень свободы электронов вместо заряда [2]. Диод Ганна – одно из первых устройств в этой области, работа которого основана на междолинном переносе электронов в присутствии сильного электрического поля [3]. Перспективным материалом для исследования и реализации новых концепций долинотроники является двумерная электронная система на основе AlAs.

В данной работе исследовались образцы из высококачественных гетероструктур AlAs/AlGaAs, содержащие узкие квантовые ямы различной ширины, и выполненных в форме стандартных Холловских мостиков. В эксперименте поглощение микроволнового излучения детектировалось по изменению продольного магнетосопротивления δR_{xx} вследствие разогрева ДЭС. В эксперименте было обнаружено радикальное изменение в спектре магнитоплазменных возбуждений при значении ширины квантовой ямы меньше 6 нм. Это указывает на изменение в заполнении электронами долин – переход от внутриплоскостных анизотропных X_{x-y} долин к внеплоскостной изотропной в плоскости ямы X_z долине. Важным результатом стало то, что в фотоотклике для квантовых ям AlAs с шириной 6 нм наблюдались два резонанса, что указывает на одновременное заполнение сильно анизотропных X_{x-y} долин и изотропной X_z долины.

Полученные результаты открывают дорогу для новых концепций устройств долинотроники.

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

Литература

- [1] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. von Molnar, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, and D. M. Treger, Science 294, 1488–1495 (2001).
- [2] M. Shayegan, E. P. De Poortere, O. Gunawan, Y. P. Shkolnikov, E. Tutuc, and K. Vakili, Phys. Status Solidi (B) 243, 3629 (2006).
- [3] J. B. Gunn, Solid State Commun. 1, 88 (1963).

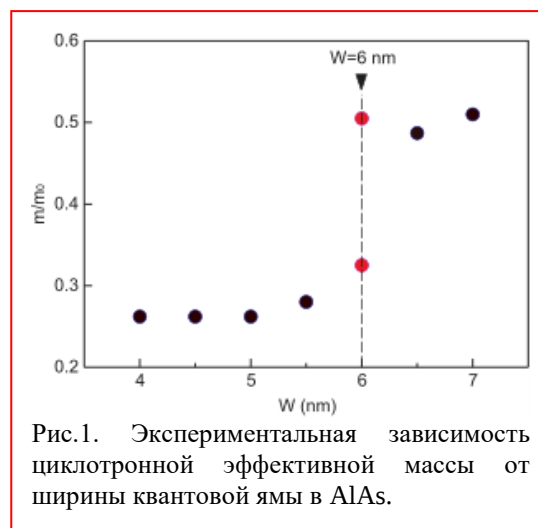


Рис.1. Экспериментальная зависимость циклотронной эффективной массы от ширины квантовой ямы в AlAs.

Перестройка энергетического спектра электронов в узких квантовых ямах AlAs

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

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

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

Последние годы много работ по электродинамике двумерных электронных систем (ДЭС) посвящены исследованию плазменных возбуждений [1]. В основном измерения проводились на гетероструктурах GaAs/AlGaAs с однодолинной изотропной ДЭС. Однако благодаря прогрессу в молекулярно-лучевой эпитаксии стало возможно получение новых полупроводниковых гетероструктур с уникальными свойствами. К таким двумерным системам относятся квантовые ямы AlAs, сочетающие в себе сильную анизотропию эффективных масс электрона и возможность контролируемого заполнения долин [2].

В настоящей работе исследовались гетероструктуры AlAs/AlGaAs с ширинами квантовых ям $W = 4.5$ и 7.0 нм. Образцы были выполнены в виде стандартных Холловских мостиков с шириной $L = 100$ мкм вдоль направления $[110]$. Резонансное поглощение микроволнового излучения детектировалось как добавка к продольному магнетосопротивлению образца δR посредством стандартной схемы двойного синхронного детектирования. Результаты экспериментов показали, что, несмотря на близкие значения концентраций в обеих структурах, происходит резкое изменение положения резонансного магнитного поля плазмона для одинаковых значений частот, что указывает на качественные изменения в системе. Из анализа дисперсий циклотронных магнитоплазменных мод были получены значения циклотронных масс: $m_c(W = 4.5 \text{ нм}) = (0.27 \pm 0.01) m_0$ и $m_c(W = 7.0 \text{ нм}) = (0.51 \pm 0.01) m_0$. Значение для образца с $W = 7.0$ нм указывает на заполнение внутрислоистовых анизотропных X_x — X_y долины, а для структуры с $W = 5.5$ нм значение близко к $m_{tr} = 0.2 m_0$, что соответствует заполнению внеплодностной изотропной в плодкости квантовой ямы X_z долины. Данный результат наглядно демонстрирует перестройку энергетического спектра электронов в узких квантовых ямах AlAs с изменением ширины W .

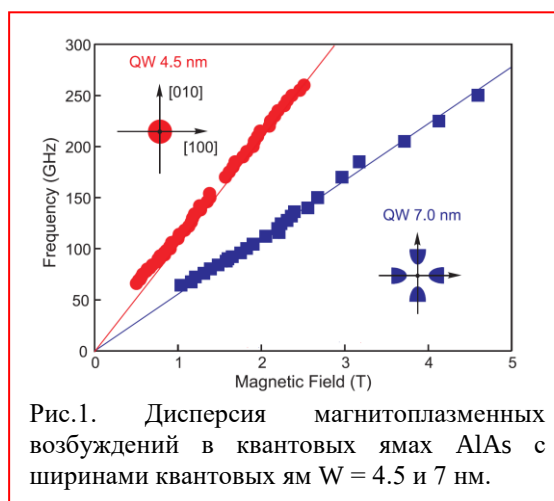


Рис.1. Дисперсия магнитоплазменных возбуждений в квантовых ямах AlAs с ширинами квантовых ям $W = 4.5$ и 7 нм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] J. Łusakowski, Semicond. Sci. Technol. 32, 013004 (2016).
- [2] M. Shayegan et al., Phys. Status Solidi B 243, 3629 (2006).

Исследование электронного парамагнитного резонанса в гетеропереходах GaN/AlGaN

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

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

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

Ряд уникальных свойств нитрида галлия и основанных на нём гетероструктур делают данный материал крайне интересным объектом для прикладного использования среди современных полупроводниковых соединений. К таким особенностям относятся: большое значение ширины запрещённой зоны, нетоксичность, высокая термостабильность. К возможным областям применения можно отнести маломощную и высокоомощностную электронику [1], спинтронику [2] и т.д..

Целью данной работы было экспериментальное исследование свойств гетеропереходов GaN/AlGaN, содержащих двумерную электронную систему, посредством методики электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). С учётом результатов предыдущих работ [3,4] диапазон возбуждающего микроволнового излучения был увеличен до 380 ГГц.

Методика детектирование спинового резонанса электронов двумерной системы в гетеропереходе GaN/AlGaN основывалась на сильной чувствительности продольного магнетосопротивления к разогреву ДЭС в режиме квантового эффекта Холла. ЭПР наблюдался в широком диапазоне частот микроволнового излучения и магнитного поля. Обнаруженная линия спинового резонанса оказалась относительно узкой с шириной до 6.5 мТл при 13.3 Тл, что является неожиданным для данных структур со столь сильным спин-орбитальным взаимодействием. Время спиновой релаксации было получено из анализа ширины резонансной линии и составляло порядка 2 нс. Исследована зависимость g-фактора от магнитного поля, величина которого была близка к значению для свободного электрона.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] B. J. Baliga, Semicond. Sci. Technol. 28, 074011 (2013).
- [2] T. Dietl, Nat. Mater. 9, 965 (2010).
- [3] A. Wolos, W. Jantsch, K. Dybko, Z. Wilamowski, and C. Skierbiszewski, AIP Conf. Proc. 893, 1313 (2007).
- [4] A. Wolos, Z. Wilamowski, C. Skierbiszewski, A. Drabinska, B. Lucznik, I. Grzegory, and S. Porowski, Phys. B Condens. Matter 406, 2548 (2011).

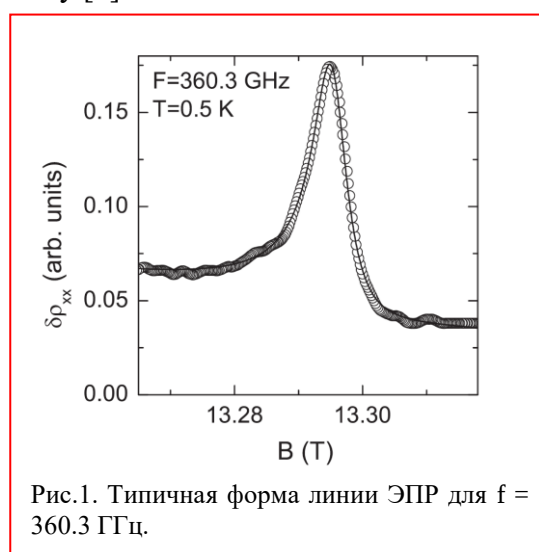


Рис.1. Типичная форма линии ЭПР для $f = 360.3$ ГГц.

Анализ содержания влаги в листьях растений

А.В.Щепетильников*, А.М.Зарезин, В.М.Муравьев, П.А.Гусихин*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru*

Обеспечение условий оптимального полива является одной из наиболее важных проблем для современного высокотехнологичного сельского хозяйства. Действительно, чрезмерный полив экономически невыгоден, поскольку при этом не только возникает перерасход ресурсов, но и ухудшается аэрация почвы, а растения становятся уязвимыми к насекомым и болезням. В свою очередь, недостаточный полив приводит к снижению урожайности и даже гибели сельскохозяйственных культур.

Необходимость полива растения удобно отслеживать по содержанию влаги в его листьях. А эту величину можно определять посредством измерения пропускания суб-ТГц излучения через листья. Дело в том, что большинство сухих биологических тканей растений прозрачны в данном частотном диапазоне, а вода хорошо поглощает и отражает такое излучение.

Работоспособность такого подхода была продемонстрирована на листьях клевера. Для измерения пропускания через листья использовалась система, состоящая из квадратной матрицы 32 x 32 чувствительных детекторов, а также источник излучения, основанный на лавинно-пролётном диоде (96 ГГц, 80 мВт). Образцы листьев располагались непосредственно на камере. Растение было высажено в горшок и регулярно поливалось. После чего полив был временно приостановлен и была измерена динамика пропускания листьев. Результирующая зависимость и типичные изображения листьев на частоте 96 ГГц показаны на рисунке 1. Хорошо видно увеличение пропускания через листья, обусловленное снижением содержания влаги в листьях. После полива величина пропускания возвращалась в исходное значение. Для сравнения показана динамика пропускания листьев, отделённых от растения. Таким образом, используя предложенный подход, можно контролировать содержание влаги в растениях, а значит, оптимизировать процедуру полива растений.

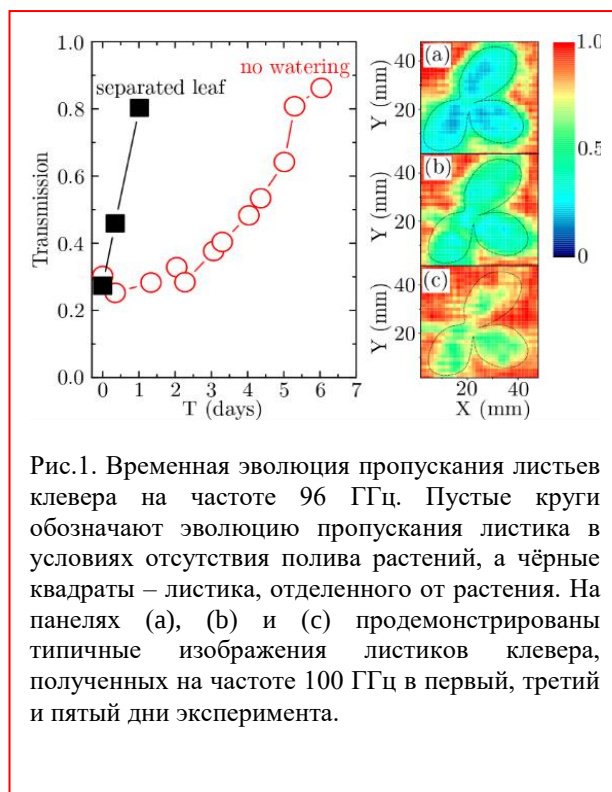


Рис.1. Временная эволюция пропускания листьев клевера на частоте 96 ГГц. Пустые круги обозначают эволюцию пропускания листика в условиях отсутствия полива растений, а чёрные квадраты – листика, отделенного от растения. На панелях (a), (b) и (c) продемонстрированы типичные изображения листиков клевера, полученных на частоте 100 ГГц в первый, третий и пятый дни эксперимента.

Новый портативный раман-люминесцентный комплекс для геммологической диагностики алмазов и бриллиантов в ювелирных изделиях

Э.Степанец-Хуссейн^{1,2*}, В.Е.Кирпичёв^{1,3}, S.Athavale⁴, M.Gershburg⁵

¹*Enhanced Spectrometry, Inc, San Jose, CA 95110, USA*

²*НИУ ВШЭ РАН, 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 20*

³*ИФТТ РАН, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д. 2*

⁴*GSI R&D Department, Mumbai-400051, India*

⁵*Gemological Science International, New York, NY 10017, USA*

*e-mail: eldar.stepanets@enspectr.com

Прорыв в технологии синтеза искусственных алмазов и последующее использование их в ювелирных изделиях под видом природных камней требует современных методов анализа и выявления контрафакта с использованием передовых достижений науки и техники. Только использование разных оптических методик [1] и набор огромной статистики может позволить сегодня геммологическим лабораториям надёжно проводить полную характеризацию алмазов и бриллиантов в ювелирных изделиях и отвечать на ключевые вопросы, определяющие истинную стоимость продукта, как то: является ли алмаз природным или синтетическим, а если синтетическим, то какая технология использовалась для роста – химическое осаждение из газовой фазы [2] или синтез при высоком давлении и высокой температуре; подвергался ли бриллиант обработке – облагораживанию при высокой температуре и давлении (HPHT-treatment) [3]. Для ответа на эти вопросы нами была разработана новая портативная раман-люминесцентная система на базе двух источников фотовозбуждения: 365 нм (лазерный диод) и 532 нм (одномодовый твёрдотельный лазер с диодной накачкой). Как оказалось, в решении данной задачи наличие именно этих двух источников необходимо и достаточно: 532 нм лазер используется при измерении КР-спектров образца, что позволяет идентифицировать минерал, 365 нм и 532 нм накачки используются для поджога характеристических люминесцентных пиков во всем диапазоне – от N3-пики (415 нм), до никелевого пика (881 нм). При этом спектральное разрешение нашего спектрометра составляло не более 11 Ангстрем по всему диапазону, что существенно при регистрации близких пиков, как например КР-линия алмаза и дефект NV0. Накачка и сбор сигнала в нашем приборе осуществляется при помощи трёх световодов: два на завод излучения (532 нм и 365 нм), и один - на сбор, которые (световоды) смыкаются в одном зонде. Такая технология имеет мощное преимущество, ибо позволяет как проводить многоуровневый анализ после всего одного измерительного теста (достаточно поднести зонд к камню на несколько секунд), так и предоставляет возможность исследовать бриллианты в сложных ювелирных изделиях, когда доступ к камню посредством стандартной линзовой оптики требует большей квалификации и затрат времени на фокусировку, а иногда - и вовсе невозможен. Аппаратную часть дополняет наше программное обеспечение с интуитивно понятным интерфейсом и вшитыми алгоритмами комплексного анализа рамановских и, что важнее, люминесцентных пиков с выводами протокольного отчёта.

Литература

- [1] A.M. Zaitsev, Optical Properties of Diamond, Springer-Verlag, Heidelberg, (2001)
- [2] Р.А. Хмельницкий, Н.Х. Талипов, Г.В. Чучева, Синтетический алмаз для электроники и оптики, Москва, (2017).
- [3] Inga A. Dobrinets, Victor. G. Vins, Alexander. M. Zaitsev, HPHT-Treated Diamonds, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2013)

ISBN 978-5-6040418-6-4

