

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики твердого тела Российской академии наук
Российский научный фонд (РНФ)**

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

Сборник тезисов



*4-5 июня 2024 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

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

4-5 июня 2024 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. **Кулик Леонид Викторович** (ИФТТ, Черноголовка)
6. **Сазонов Андрей Гаврилович** (ООО «Южполиметал», Москва)
7. **Дрёмин Алексей Анатольевич** (ООО «МВЭЙВ», Москва)
8. **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. **Лангваген Екатерина Сергеевна** (ИФТТ, Черноголовка)

ISBN 978-5-6045956-4-0



9 785604 595640

ISBN 978-5-6045956-4-0

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ПЛАЗМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.

- В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин.** Новые плазменные физические явления для развития терагерцовой электроники7
- В.М.Муравьев, К.Р.Джигирба, М.С.Соколова,* А.С.Астраханцева, И.В.Кукушкин.** Супердисперсионный плазмонный метаматериал.....9
- А.В.Никонов, А.А.Заболотных, В.А.Волков.** Плазмоны в 2D электронной системе с массивом затворов10
- Д.А.Родионов, И.В.Загороднев.** Магнитодисперсия плазменных колебаний в сильно экранированном двумерном электронном газе в форме прямоугольника в пределе больших магнитных полей11

СЕКЦИЯ 2. ФИЗИКА 2Д-ЭЛЕКТРОНОВ.

- Л.В.Кулик.** Резонансная фотолюминесценция возбужденной лафлиновской жидкости...12
- Г.А.Николаев, А.Р.Хисамеева, С.А.Андреева, Я.В.Федотова, А.А.Дрёмин, А.В.Щепетильников, И.В. Кукушкин.** Микроволновая спектроскопия ферромагнитного перехода двумерной сильнокоррелированной электронной системы в режиме Квантового эффекта Холла.....13
- А.С.Петров, Д.А.Свинцов.** Высокочастотный эффект Холла и поперечно-электрические гальваномагнитные волны в двумерных электронных системах с дрейфом.....15

СЕКЦИЯ 3. НОВЫЕ СИСТЕМЫ.

- Т.Е.Пылаев, С.С.Веретенников, В.Д.Тупикин, З.Р.Зенченко.** Сверхъяркие нанометки: на пути создания супер-разрешающих систем для генодиагностики.....16
- Т.Д.Рудаков, А.С.Астраханцева, С.М.Макаровская, В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин.** Обнаружение осцилляций гигантского усиления интенсивности рамановского рассеяния света в периодических плазмонных структурах в зависимости от толщины металлического слоя.....17
- А.А.Максимов, И.И.Тартаковский, Н.А.Абдуллаев, В.Н.Зверев.** Исследования спин-фононного взаимодействия в магнитных топологических изоляторах $MnBi_2Te_4$ и $MnSb_2Te_4$ методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.....17
- С.Н.Терешко, А.А.Деменев, В.Д.Кулаковский.** Оптические исследования экситонных состояний в перовските $CsPbBr_3$ 19

СЕКЦИЯ 4. ПЛАЗМЕННЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ -2.

- И.В.Андреев, В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин.** Эффект Парселла для плазмонов в двумерной системе с задним затвором.....20

<u>А.С.Казаков</u>, И.В.Андреев, В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин. Обнаружение новой двумерной плазменной моды в разрезном кольцевом резонаторе.....	21
В.А.Волков. Взаимодействие околосатворных плазмонов в многосатворных 2D электронных системах.....	22
<u>И.В.Загороднев</u>, Д.А.Родионов. Плазмоны в латерально ограниченных анизотропных сильно экранированных двумерных электронных системах.....	23

СЕКЦИЯ 5. ЭКСИТОНЫ-ПОЛЯРИТОНЫ.

<u>А.В.Горбунов</u>, П.С.Бережной, А.С.Кореев, В.В.Соловьев, Л.В.Кулик, В.Б.Тимофеев. Магнитоэкситонный конденсат в квантово-холловском диэлектрике: фазовая диаграмма.	24
<u>А.А.Деменев</u>, С.Н.Терешко, С.С.Гаврилов, В.Д.Кулаковский. Параметрическое рассеяние экситонных поляритонов в микрорезонаторе с пониженной вращательной симметрией.....	25
<u>Н.Н.Ипатов</u>, С.С.Гаврилов. Оптическая мультстабильность экситонных поляритонов в размерно-квантованном резонаторном микростолбике.....	26
<u>А.А.Деменев</u>, С.Н.Терешко, Н.А.Гиппиус, В.Д.Кулаковский. Влияние потенциала беспорядка на динамику резонансно возбужденных некогерентных экситонных поляритонов в высокодобротных GaAs микрорезонаторах.....	27

СЕКЦИЯ 6. ФИЗИКА 2D-ЭЛЕКТРОНОВ-2.

<u>С.И.Дорожкин</u>, А.А.Капустин, И.Б.Федоров. Гигантское перераспределение плотности электронов поперек широкой квантовой ямы GaAs при их конденсации на нижний уровень Ландау.....	28
<u>А.С.Кореев</u>, А.Б.Ваньков, П.С.Бережной, И.В.Кукушкин. Корреляционная и обменная энергия сильнокоррелированной двумерной электронной системы в ультраквантовом пределе.....	29
<u>А.В.Ларионов</u>, Л.В.Кулик. Изучение временной динамики сигнала фотоотражения при дробном факторе заполнения $\nu=1/3$ в секундном диапазоне.....	30

СЕКЦИЯ 7. НОВЫЕ СИСТЕМЫ-2.

<u>А.С.Бричкин</u>, Г.М.Гольшков, А.В.Черненко, В.Е.Бисти. Возбуждённые состояния экситонов в монослоях MoSe ₂ и WSe ₂ в спектрах отражения вплоть до комнатной температуры.....	31
<u>А.В.Черненко</u>, А.С.Бричкин, Г.М.Гольшков. Влияние свободных носителей заряда на экситоны в гетероструктурах с монослоями дихалькогенидов переходных металлов.....	32

СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ.

<u>С.А.Андреева</u>, А.В.Щепетильников, А.Р.Хисамеева, Г.А.Николаев, И.В.Кукушкин. Ферромагнитный фазовый переход в сильно коррелированных двумерных электронных системах с псевдоспиновой степенью свободы в условиях приложенного механического напряжения.....	33
<u>А.Ю.Субекин</u>, Т.Е.Пылаев, В.И.Кукушкин, Е.В.Рудакова. SERS-детекторы для определения патогенов различного происхождения.....	34

<u>И.Ш.Бахтеев,</u> <u>С.Ю.Молчанов,</u> <u>В.М.Муравьев.</u> Исследование резистивных согласованных нагрузок на основе НЛП.....	35
<u>П.С.Бережной,</u> <u>А.Б.Ваньков,</u> <u>А.С.Кореев,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Спиновая жесткость двумерной электронной системы в ультраквантовом пределе.....	37
<u>В.Е.Бисти,</u> <u>А.С.Бричкин,</u> <u>Г.М.Голышков,</u> <u>А.В.Черненко.</u> Люминесценция монослоев MoSe ₂ : влияние температуры и накачки.....	38
<u>А.И.Дмитриев,</u> <u>Л.С.Паршина,</u> <u>М.С.Дмитриева,</u> <u>О.Д.Храмова,</u> <u>О.А.Новодворский.</u> Магнетизм пленок InMnSb.....	39
<u>М.С.Дмитриева,</u> <u>А.И.Дмитриев,</u> <u>В.Д.Седых.</u> Температура магнитного упорядочения в La _{1-x} Sr _x FeO _{3-δ} и влияние на нее вакуумной термообработки.....	40
<u>Ю.В.Чумаченко,</u> <u>Д.В.Новиков,</u> <u>И.Ю.Белоконева,</u> <u>С.В.Дубков,</u> <u>Д.Г.Громов,</u> <u>В.Д.Громов,</u> <u>Е.А.Лебедев,</u> <u>Л.С.Волкова,</u> <u>Т.С.Гришин.</u> Исследование влияния метода активации на эффективность ГКР-подложки на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O.....	41
<u>М.С.Соколова,</u> <u>К.Р.Джикирба,</u> <u>А.С.Астраханцева,</u> <u>И.В.Кукушкин,</u> <u>В.М.Муравьев.</u> Плазменный отклик металлической “решётчатой” метаповерхности на подложке.....	42
<u>Г.М.Голышков,</u> <u>А.С.Бричкин,</u> <u>В.Е.Бисти,</u> <u>А.В.Черненко.</u> Спектры отражения двумерных экситонов в гетероструктурах с монослоями MoSe ₂ и WSe ₂	43
<u>А.Р.Хисамеева,</u> <u>А.В.Щепетильников,</u> <u>А.А.Дремин,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Исследование спин-орбитального взаимодействия в гетеропереходах ZnO/MgZnO посредством спектроскопии спинового резонанса.....	44
<u>В.Е.Кирпичев,</u> <u>Т.Д.Рудаков,</u> <u>А.С.Астраханцева,</u> <u>В.В.Соловьев,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Соотношение интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент спектра рамановского рассеяния света с гигантским поверхностным усилением при мощном импульсном лазерном возбуждении.....	45
<u>А.А.Лычагина,</u> <u>В.А. Власенко.</u> Изучение транспортных свойств потенциального топологического изолятора SrSn ₂ As ₂	46
<u>С.М.Макаровская,</u> <u>В.В.Соловьев,</u> <u>Т.Д.Рудаков,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Исследование возможности применения островковых SERS-структур на основе GaP для инфракрасного частотного диапазона.....	47
<u>А.С.Астраханцева,</u> <u>С.М.Макаровская,</u> <u>В.В.Соловьев,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Зависимость коэффициента усиления SERS-структур с большим периодом модуляции от высоты диэлектрических столбиков.....	48
<u>А.А.Максимов,</u> <u>И.И.Тартаковский.</u> Экспериментальные исследования порогов генерации циркулярно поляризованного излучения инжекционных полупроводниковых лазеров.....	49
<u>С.Ю.Молчанов,</u> <u>И.Ш.Бахтеев,</u> <u>В.М.Муравьев.</u> Исследование распространения радиоволн субтерагерцового диапазона в сверхразмерных металл-диэлектрических волноводах.....	50
<u>В.А.Мушенков,</u> <u>В.И.Кукушкин,</u> <u>А.Н.Нечаев,</u> <u>Е.Г.Завьялова.</u> Использование ГКР-активных мембран для single-cell анализа антибиотикорезистентности.....	52
<u>Д.В.Новиков,</u> <u>А.И.Новосельцев,</u> <u>Е.А.Лебедев,</u> <u>Д.Г.Громов,</u> <u>Ю.В.Чумаченко,</u> <u>С.В.Дубков,</u> <u>Р.М.Рязанов.</u> Исследование и формирование ГКР-активных слоев на основе высокоэнергетических материалов Al и CuO _x	53
<u>Т.Д.Рудаков,</u> <u>А.С.Астраханцева,</u> <u>В.Е.Кирпичев,</u> <u>В.В.Соловьев,</u> <u>И.В.Кукушкин.</u> Исследование масштаба дальнего действия эффекта гигантского усиления сигнала рамановского рассеяния в структурах с комбинированным плазмон-диэлектрическим резонансом.....	54

<u>Л.И.Сорокина, К.И.Пак, А.М.Тарасов, С.С.Самсонов, С.В.Дубков, Д.Г.Громов.</u> Формирование и исследование фотоактивных гетероструктур $\text{TiO}_2\text{-ZnO/УНТ}$	55
А.М.Тарасов, С.В.Дубков, Л.И.Сорокина, М.Д.Кружалина, Р.А.Фархудинов, Д.В.Козлов, А.В.Трегубов, Д.Г.Громов. Исследование влияния термической обработки одномерных нанокристаллов TiO_2 на фотокаталитическое восстановление CO_2	56
<u>Д.С.Тихонова, В.И.Кукушкин, А.Н.Нечаев, Е.Г.Завьялова.</u> Повышение чувствительности аптамерных тест-полосок для определения вируса гриппа А с помощью ГКР-эффекта.....	57
<u>С.В.Зайцев, А.И.Дмитриев.</u> Комбинационное рассеяния света в ферромагнитных нанопроволоках $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$	58
<u>С.В.Зайцев, А.И.Дмитриев.</u> Комбинационное рассеяния света в ферромагнитных нанопроволоках $\text{Ge}_{1-x}\text{Co}_x$	59
<u>С.В.Зайцев.</u> Поверхностно-усиленное рамановское рассеяние на сетках с субмикронным серебряным покрытием.....	60

Новые плазменные физические явления для развития терагерцовой электроники

В.М.Муравьев,* И.В.Кукушкин

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

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

Современная электроника стремительно развивается вверх по частоте, открывая новые технологические и научные горизонты [1]. За последние десятилетия наблюдается увеличение рабочих частот полупроводниковых устройств на базе GaAs, GaN, SiGe и SiC в частотный диапазон 100 ГГц и выше. Это открывает целый ряд принципиально новых приложений. С возрастанием рабочей частоты возрастает пропускная способность и скорость передачи данных в беспроводных системах. Что позволяет создавать более быстрые и надежные сети связи поколения 5G/6G и разрабатывать новые методы передачи информации. Высокочастотная электроника играет ключевую роль в развитии беспилотных транспортных средств, обеспечивая быструю передачу и обработку данных, необходимых для навигации, обнаружения препятствий и принятия решений в режиме реального времени. Высокая рабочая частота позволяет создавать более точные радарные системы, способные обнаруживать и отслеживать цели на больших расстояниях с высоким разрешением. Поэтому научные исследования в области электроники, работающей в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне (100 ГГц - 1 ТГц) является актуальнейшей государственной задачей.

Ключевым элементом современной электроники является транзистор (от англ. transistor, что происходит от transfer «перенос; перемещение» + resistor «резистор, сопротивление»). Работа транзистора основана на том, что сопротивление канала транзистора может управляться напряжением на затворе. На используемых сейчас частотах транзистор выступает в качестве резистора, активным сопротивлением которого можно управлять. Однако, если рабочая частота полупроводниковых устройств начинает превышать обратное время электронной релаксации, то согласно модели Друде, импеданс устройства становится реактивным, меняя всю физику работу системы. Этот реактивный импеданс является следствием проявлений плазменных эффектов в канале полупроводниковых устройств. Было установлено, что для промышленных AlGaAs/GaAs полупроводниковых гетероструктур частота, выше которой электронная система начинает вести себя как новый физический объект - двумерная плазма, составляет 300 ГГц [2]. Таким образом, изучение новых плазменных эффектов является крайне актуальной научной проблемой для освоения ТГц частотного диапазона.

За последние годы в нашей группе получен ряд новых физических результатов в области двумерной плазмоники. В частности, обнаружен новый тип электромагнитных плазменных волн, распространяющихся в двумерной электронной системе на полупроводниковой подложке [3]. Полученные результаты были использованы для разработки нового физического принципа для построения ТГц фазовращателей [4]. При прохождении электромагнитного излучения через двумерный электронный слой фаза излучения может управляемо перестраиваться в пределах от 0 до 90 градусов. Также получены новые результаты в области создания и изучения плазменных метаматериалов и метаповерхностей. В частности, продемонстрировано, что слоистый материал из кремниевых чипов с решетчатой металлической сеткой на поверхности демонстрирует любопытный электродинамический отклик в ТГц частотном диапазоне.

Литература

- [1] Xi-Cheng Zhang, Jingzhou Xu "Introduction to THz Wave Photonics" (2010).
- [2] K. R. Dzhikirba, A. Shuvaev, D. Khudaiberdiev, I. V. Kukushkin, V. M. Muravev, Appl. Phys. Lett. 123, 052104 (2023).
- [3] A. Shuvaev, V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, J. Gospodarič, A. Pimenov, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 126, 136801 (2021).
- [4] V. M. Muravev, A. Shuvaev, A. S. Astrakhantseva, P. A. Gusikhin, I. V. Kukushkin, A. Pimenov, Appl. Phys. Lett. 121, 051101 (2022)

Супердисперсионный плазмонный метаматериал

**В.М.Муравьев,¹ К.Р.Джикирба,^{1,2} М.С.Соколова,^{1,2*} А.С.Астраханцева,^{1,2}
И.В.Кукушкин¹**

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

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Долгопрудный, Россия*

**e-mail: sokolova.ms@phystech.edu*

Терагерцовая и субтерагерцовая квазиоптика имеют широкое практическое применение в различных системах неразрушающего контроля, детектирования веществ и контроля безопасности. В данной работе реализуется простая технология получения трехмерного плазмонного метаматериала из стопки кремниевых чипов с литографически нанесенной на их поверхность металлической сетки, состоящей из Cr (25 нм) и Au (700 нм). Образцы показали сильную дисперсионную зависимость, этот эффект дает возможность создания прибора, эффективно управляющего направлением прошедшего через него излучения.

Исследуемые образцы представляли собой плоскопараллельные пластины из высокорезистивного (> 30 кОм \times см) кремния с напыленной с одной стороны металлической сеткой. Были проведены две серии экспериментов с квадратными образцами 1×1 см² толщиной $d = 105$ и 210 мкм. С помощью оптической фотолитографии на их поверхности была изготовлена решётчатая металлическая структура с квадратной элементарной ячейкой с периодом $a = 100, 200$ и 300 мкм и шириной полосок $w = 5-30$ мкм. Отношение w/a для всех образцов не превышало 0.1 . Металлический слой, содержащий Cr (25 нм) и Au (700 нм), термически напылялся в вакуумной камере на поверхность кремниевой подложки. Кремниевые чипы плотно прижимались друг к другу, образуя стопку из 2-8 слоев. В качестве источника непрерывного терагерцового излучения использовались лампы обратной волны (ЛОВ) с диапазоном частот $50 - 500$ ГГц. Мощность излучения, прошедшего через образцы, регистрировалась пироэлектрическим детектором. Для подавления шумов падающее на образец электромагнитное излучение модулировалось оптико-механическим модулятором с частотой 23 Гц.

Было установлено, что такие чипы имеют очень сильную дисперсионную зависимость (рис. 1), которая намного выше, чем зависимость при данных частотах в обычных материалах. Для подтверждения экспериментальных наблюдений было проведено численное моделирование на аналогичных структурах в среде HFSS. Было получено, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Таким образом изученный метаматериал представляет собой интересную систему для управления направлением прошедшего излучения и имеет практическую значимость в области терагерцовой спектроскопии.

Авторы благодарны поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-72-30003).

Плазмоны в 2D электронной системе с массивом затворов

А.В.Никонов,^{1,2} А.А.Заболотных,¹ В.А.Волков¹ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11, корп. 7²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия

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

Коллективные колебания носителей заряда – плазмоны – в двумерных (2D) электронных системах (ЭС) представляют значительный практический интерес в связи с созданием на их основе приборов (генераторов и детекторов) гига- и терагерцового частотных диапазонов. Особенно перспективными являются т.н. экранированные 2D ЭС, когда вблизи 2D слоя находятся металлические электроды (затворы) [1,2].

В работе рассматриваются плазмоны в типичной системе: 2D ЭС с массивом (решеткой) металлических затворов в форме полос. Как правило, в таких системах рассматриваются плазмоны, распространяющиеся поперек затворов. Однако, недавно было обнаружено, что в 2D ЭС с одиночным затвором в форме полосы могут существовать необычные плазмоны, распространяющиеся вдоль затвора [3,4]. Данная работа обобщает результаты статьи [4] на случай решетки затворов. При этом основное внимание, как и в [4], уделено плазмонам, распространяющимся вдоль затворов.

В работе изучены две конфигурации затворов. В первой решетка затворов является бесконечной периодической и, таким образом, для плазмонов формируется подобие «кристалла» с образованием запрещенных и разрешенных частотных зон. Также в работе исследуется полубесконечная решетка затворов, соответствующая «кристаллу с границей», причем крайний затвор может отличаться по своим параметрам от остальных затворов. В данной работе в качестве такого параметра выбрана ширина затвора. Получено, что в 2D ЭС с полубесконечной решеткой затворов, если ширина крайнего затвора отличается от ширины затворов «внутри» решетки, возможно появление локализованных около края и распространяющихся вдоль него плазменных волн, которые мы называем таммовскими по аналогии с электронными состояниями, возникающими из-за обрыва кристаллического потенциала. Проанализирована структура таммовских мод, получено, что основная (нижняя по частоте) таммовская плазменная мода всегда является щелевой. Найдена величина частотной щели в спектре основной таммовской моды, а также асимптотики этой моды. Дан краткий анализ более высоких по частоте таммовских плазменных мод.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

- [1] W. Knap et al., J. Infrared Millim. Terahertz Waves **30**, 1319 (2009).
- [2] V. M. Muravev and I. V. Kukushkin, Appl. Phys. Lett. **100**, 082102 (2012).
- [3] V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, A. M. Zarezin et al., Phys. Rev. B **99**, 241406(R) (2019).
- [4] A. A. Zabolotnykh and V. A. Volkov, Phys. Rev. B **99**, 165304 (2019).

Магнитодисперсия плазменных колебаний в сильно экранированном двумерном электронном газе в форме прямоугольника в пределе больших магнитных полей

Д.А.Родионов,^{1,2*} И.В.Загороднев¹

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

²МФТИ, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

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

Исследование свойств плазменных колебаний (плазмонов) в двумерных электронных системах является фундаментальной задачей, находящей отклик в прикладных сферах. Так в недавней экспериментальной работе [1] изучались плазменные колебания в системе в форме квадрата, в частности, зависимость их частоты от внешнего магнитного поля (магнитодисперсия). Было обнаружено «расталкивание» магнитодисперсий плазменных мод, которое не наблюдается, к примеру, в дисках.

В нашей теоретической работе исследуются свойства собственных магнитоплазменных колебаний в прямоугольном двумерном электронном газе, расположенном вблизи идеально проводящей металлической пластины (затвора) и помещенном в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Задача решалась в пределе сильной экранировки, т.е. рассматривался случай малости расстояния между электронным газом и металлом по сравнению с размерами прямоугольника и длинами волн изучаемых плазменных колебаний.

Как и в работе [1], в магнитодисперсии плазменных колебаний наблюдается «расталкивание». Кроме этого, частоты всех плазменных мод в сильных магнитных полях стремятся к нулю, включая фундаментальную. Это отличается от известного поведения магнитодисперсии фундаментальной моды, являющейся краевым магнитоплазмоном, в других геометриях таких как диск, полоса или полуплоскость [2], где частота принимает ненулевое асимптотическое значение. В частном случае квадратной геометрии, получены аналитические аппроксимации магнитодисперсий трёх нижайших по частоте плазменных мод. Установлено, что в сильных магнитных полях частоты всех мод обратно пропорциональны циклотронной частоте.

Кроме этого, показано, что динамика магнитоплазменных колебаний в латерально ограниченных двумерных электронных системах описывается схожими уравнениями для динамики волн на мелкой воде в бассейне той же геометрии, подверженной воздействию силы Кориолиса. Таким образом все свойства плазменных колебаний могут быть перенесены на гидродинамические волны, называемые в этом случае ротационно-гравитационными. Аналогом циклотронной частоты выступает частота Кориолиса.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Родионов Д.А. благодарит Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-5-133-1).

Литература

- [1] A.M. Zarezin, D. Mylnikov, A.S. Petrov, D. Svintsov, P.A. Gusikhin, I.V. Kukushkin, V.M. Muravev, Phys. Rev. B 107, 075414 (2023).
 [2] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials 13, 975 (2023).

Резонансная фотолюминесценция возбужденной лафлиновской жидкости

Л.В.Кулик*

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

Исследованы спектры резонансной фотолюминесценции и резонансного отражения двумерной электронной системы в условиях формирования лафлиновской жидкости в дробном состоянии квантового эффекта Холла $1/3$ в квантовых ямах на основе полупроводниковых соединений GaAs/AlGaAs. Обнаружено, что интенсивность сигнала резонансного отражения зависит существенно нелинейно от мощности фотовозбуждения, вследствие заполнения лафлиновской жидкости нейтральными возбуждениями с нулевым импульсом и единичном спином (спин-магнитогравитонами) [1,2]. В то же время сигнал резонансной фотолюминесценции зависит линейно от мощности фотовозбуждения, что указывает на то, что интенсивность резонансной фотолюминесценции не связана с заполнением нейтральными возбуждениями лафлиновской жидкости. При этом, как было обнаружено в работе [3], сама резонансная фотолюминесценция служит универсальным маркером формирования лафлиновской жидкости в дробном состоянии $1/3$, так как вероятности оптических переходов с нулевого уровня Ландау электронов на нулевой уровень Ландау тяжелых дырок в квантовой яме изменяются столь сильно при формировании лафлиновской жидкости, что это изменение невозможно объяснить в рамках существующих теоретических представлений [4,5]. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наблюдаемое изменение вероятностей оптических переходов с нулевого уровня Ландау электронов на нулевой уровень Ландау тяжелых дырок не связаны с заполнением лафлиновской жидкости нейтральными возбуждениями, а являются следствием возникновения дополнительных правил отбора, препятствующих формированию в лафлиновской жидкости электронейтральных дефектов с нулевым импульсом, состоящих из дополнительного электрона в объеме лафлиновской жидкости и фотовозбужденной дырки в валентной зоне.

Литература

- [1] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozеров, A. B. Vankov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin & V. Y. Umansky, *Nature Commun.* 12, 6477 (2021).
- [2] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, A. V. Larionov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin, *Appl. Phys. Lett.* 123, 083101 (2023).
- [3] Л. В.Кулик, А. С.Журавлев, Е. И.Белозеров, В. А.Кузнецов, И. В. Кукушкин, *Письма в ЖЭТФ* 112, 516 (2020).
- [4] И. В. Лернер, Ю. Е. Лозовик, *ЖЭТФ* 78, 1167 (1980).
- [5] V. M. Apalkov and E. I. Rashba, *Phys. Rev. B* 46, 1628 (1992).

Микроволновая спектроскопия ферромагнитного перехода двумерной сильнокоррелированной электронной системы в режиме Квантового эффекта Холла

Г.А.Николаев,^{1,2*} А.Р.Хисамеева,¹ С.А.Андреева,^{1,3} Я.В.Федотова,¹ А.А.Дрёмин,¹ А.В.Щепетильников,¹ И. В. Кукушкин¹

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия

*e-mail: nikolaevgk@gmail.com

В работе изучается двумерная электронная система гетероперехода ZnO/MgZnO. Кулоновская энергия в этой системе в несколько раз превышает энергию Ферми, так что наблюдаются новые эффекты физики сильно коррелированных электронных систем. Основная методика нашей работы - ЭПР спектроскопия. Она доказала свою эффективность в изучении магнитного порядка основного состояния системы, поскольку возбуждение спинового резонанса основано на несбалансированной спиновой заселённости электронной системы. Эксперимент был проведён в криостате ^3He при температуре 0.5 К и в однородном магнитном поле до 15 Т. Спиновый резонанс индуцировался субтерагерцевым излучением и наблюдался в виде пика сопротивления при изменении магнитного поля [1]. Чтобы улучшить соотношение сигнал-шум, ЭПР детектировался методикой двойного синхронного усиления. Изучался образец ZnO/MgZnO с омическими индиевыми контактами в стандартной геометрии ван дер Пау. Ранее, уже изучался ферромагнитный переход в режиме Квантового эффекта Холла на факторе заполнения $\nu=2$ [2]. Фазовый переход индуцировался изменением угла наклона Θ двумерной электронной системы относительно направления магнитного поля. Угол Θ модулирует отношение энергии Зеемана и циклотронной энергии, так что при разных углах спиновое упорядочение разное. В работе [2] это приводило к значительному изменению амплитуды ЭПР в разных магнитных фазах, а также к уширению и расщеплению ЭПР на несколько пиков в непосредственной близости от пика магнетосопротивления при критическом угле.

Наша работа посвящена изучению ферромагнитного перехода основного состояния на нечётных факторах заполнения.

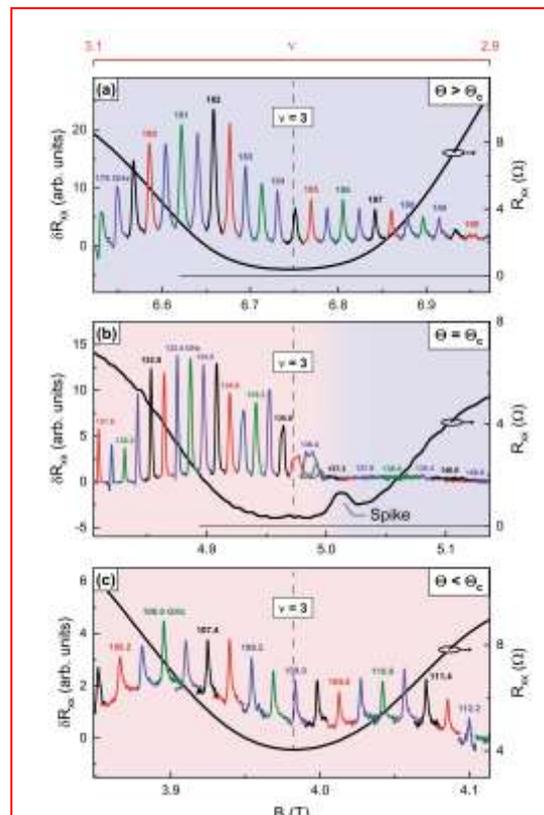


Рис.1. Эволюция пиков ЭПР при изменении угла Θ в факторе заполнения КЭХ $\nu=3$.

На Рис. 1 представлен основной результат – эволюция пиков ЭПР при изменении Θ на факторе $\nu=3$. Меняя частоту излучения и подстраивая магнитное поле, последовательно детектируется ЭПР и проходитесь весь фактор заполнения КЭХ. Разными цветами обозначены пики, возбуждаемые на разных резонансных частотах. Черная сплошная кривая соответствует продольному магнетосопротивлению, а именно участку вблизи фактора $\nu=3$ КЭХ. Как и в работе [2], наблюдается увеличение амплитуды ЭПР при переходе из магнитной фазы при $\Theta < \Theta_c$ (Рис. 1 (с)) в магнитную фазу при $\Theta > \Theta_c$ (Рис. 1 (а)). Однако в отличие от фактора заполнения $\nu=2$, где увеличение угла приводит к переходу системы из парамагнитного в ферромагнитное состояние, вблизи заполнения $\nu=3$ переход происходит между двумя ферромагнитными фазами с разной степенью спиновой поляризации. Вблизи пика магнетосопротивления, ассоциированного с ферромагнитным переходом на критическом угле $\Theta = \Theta_c$, пики ЭПР уширяются, а в области больших магнитных полей не наблюдаются вовсе (Рис. 1 (b)), что также свидетельствует об изменении спинового порядка основного состояния.

Литература

- [1] D. Stein, K. v. Klitzing, and G. Weimann Phys. Rev. Lett. 51, 130 – Published 11 July 1983
- [2] A. V. Shchepetilnikov, A.R. Khisameeva, Y.A. Nefyodov, et al. Jetp Lett. 113, 657–661 (2021).

Высокочастотный эффект Холла и поперечно-электрические гальваноманнитные волны в двумерных электронных системах с дрейфом

А.С.Петров,* Д.А.Свинцов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

*e-mail: petrov.as@mipt.ru

В работе мы показываем, что взаимодействие постоянного дрейфа носителей заряда в двумерных электронных системах (ДЭС) с магнитным полем ТЕ-волны (которое можно назвать высокочастотным эффектом Холла) оказывает заметное влияние на высокочастотную проводимость и электромагнитные свойства ДЭС. Мы выводим соответствующий тензор электродинамической проводимости:

$$\sigma^{ED} = \frac{\sigma_0}{\tilde{\omega} - \mathbf{k}\mathbf{u}_0} \begin{pmatrix} \frac{\omega^2 + (k_y u_0)^2}{\omega - \mathbf{k}\mathbf{u}_0} & k_y u_0 \\ k_y u_0 & \omega - \mathbf{k}\mathbf{u}_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

и предсказываем образование двумерных гальваноманнитных волн (2Д ГМВ) со спектром

$$\omega = \mathbf{k}\mathbf{u}_0 - \frac{i}{\tau} \frac{A^2}{1 + A^2}, \quad (2)$$

аналогичным спектру ГМВ в объемных полупроводниках [1,2]; в формулах (1), (2) $\sigma_0 = ie^2 n_{2d} / m\omega$, $e > 0$ – заряд электрона, m – эффективная масса, ω – круговая частота, $\tilde{\omega} = \omega + i/\tau$, τ – эффективное время рассеяния электронов на фононах и/или примесях, n_{2d} – поверхностная плотность носителей заряда в ДЭС, ДЭС лежит в плоскости ОХУ, дрейф \mathbf{u}_0 направлен вдоль оси ОХ, волновой вектор \mathbf{k} лежит в плоскости ДЭС (рис. 1).

В результате мы находим, что 2Д ГМВ реализуется как провал в коэффициенте *отражения* эванесцентной ТЕ волны, падающей на ДЭС. Также мы исследуем отклик ДЭС на возбуждающее излучение с учетом электродинамического тензора (1) и определяем отличия от предсказаний квазистатического подхода. В частности, мы находим, что высокочастотный эффект Холла ответственен за двойное лучепреломление эванесцентной ТЕ-волны, падающей на ДЭС, и, наиболее вероятно, за черенковское усиление падающей волны в пределе низких частот.

В то же время, квазистатический подход может использоваться при описании поперечно-магнитных плазменных волн (при $v_p \ll c$, где v_p – фазовая скорость такой волны), а также в электродинамических задачах со специфической геометрией (например, однородных по оси, перпендикулярной дрейфу).

Литература

- [1] A. Morozov and P. Shubin, On the theory of electromagnetic effects in the presence of the Hall effect, Sov. Phys. JETP 19, 484 (1964).
 [2] V. Kopylov, Galvanomagnetic waves in bismuth, JETP Letters 29, 23 (1979).

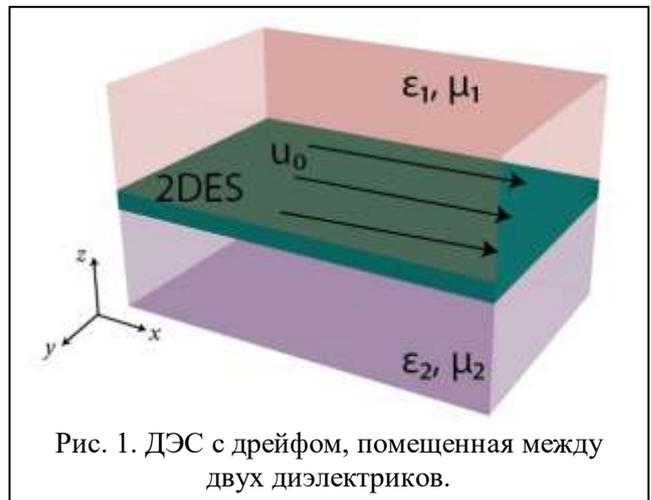


Рис. 1. ДЭС с дрейфом, помещенная между двух диэлектриков.

Сверхъяркие нанометки: на пути создания супер-разрешающих систем для генодиагностики

Т.Е.Пылаев,^{1*} С.С.Веретенников,¹ В.Д.Тупикин,^{1,2} З.Р.Зенченко¹

¹ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского Минздрава России, 410012, Саратовская обл., г. Саратов, ул. Большая Казачья, 112

²Саратовский медицинский университет «Ревиз», 410012, Саратовская обл., г. Саратов, ул. Верхний рынок, 10

*e-mail: pylaevte@gmail.com

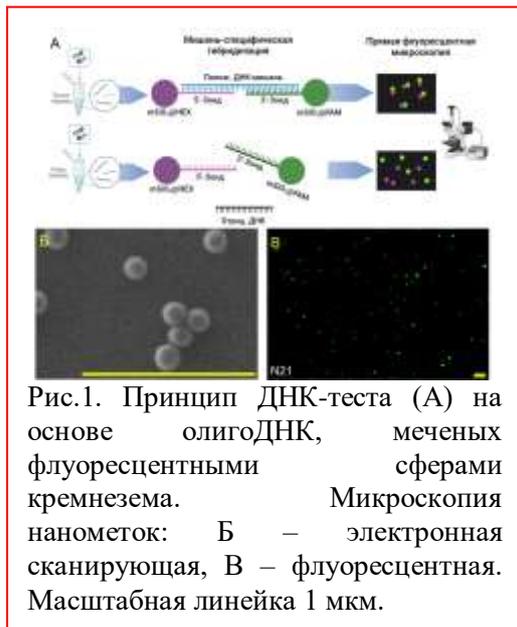


Рис.1. Принцип ДНК-теста (А) на основе олигоДНК, меченых флуоресцентными сферами кремнезема. Микроскопия нанометок: Б – электронная сканирующая, В – флуоресцентная. Масштабная линейка 1 мкм.

Разработка методов прямой ДНК-диагностики для выявления возбудителей и/или генетических маркеров социально-значимых заболеваний является одной из главных приоритетных задач современной биомедицины. Основу подобных тест-систем составляют специфические ДНК-зонды, способные к однозначному молекулярному узнаванию искомым мишеней по принципу комплементарности. В зависимости от формата проведения теста, индикация ДНК-мишени регистрируется по изменению/развитию цвета и интенсивности поглощения, люминесценции либо рассеяния света в анализируемой пробе.

Настоящая работа посвящена созданию прототипов генетических тест-систем с прямой детекцией результатов методом стандартной

световой микроскопии во флуоресцентном режиме. Предлагаемый вариант основан на выявлении ДНК-мишеней, гибридизующихся с олигоДНК-зондами, мечеными мультицветными флуоресцирующими субмикронными сферами диоксида кремния. Мультиплексный формат реализуется за счет применения набора сфер, меченых флуорофорами с максимумами длин волн возбуждения и эмиссии, типичными для каналов детекции стандартного флуоресцентного микроскопа. Возможность прямого количественного учета без предварительной амплификации числа копий ДНК-мишеней достигается благодаря ультравысокой яркости, супермонодисперсности и отсутствию фотообесцвечивания флуорофоров, включенных в структуру частиц кремнезема, видимых в поле зрения микроскопа в виде дискретных точек. Наконец, предлагаемый подход лишен ограничений по длине обнаруживаемых фрагментов мишеней (в отличие от традиционного метода ПЦР в режиме реального времени с ограничением по длине ампликонов до 200 пар нуклеотидов), что открывает крайне перспективные возможности для детекции протяженных участков, или выявления нескольких мутаций в одном локусе за счет использования мультицветных ДНК-зондов. Мы надеемся, что разрабатываемая технология позволит проводить абсолютное количественное определение целевых нуклеотидных последовательностей без использования дорогостоящих реагентных смесей и оборудования для амплификации и детекции сигнала.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-25-00420, <https://rscf.ru/project/24-25-00420/>

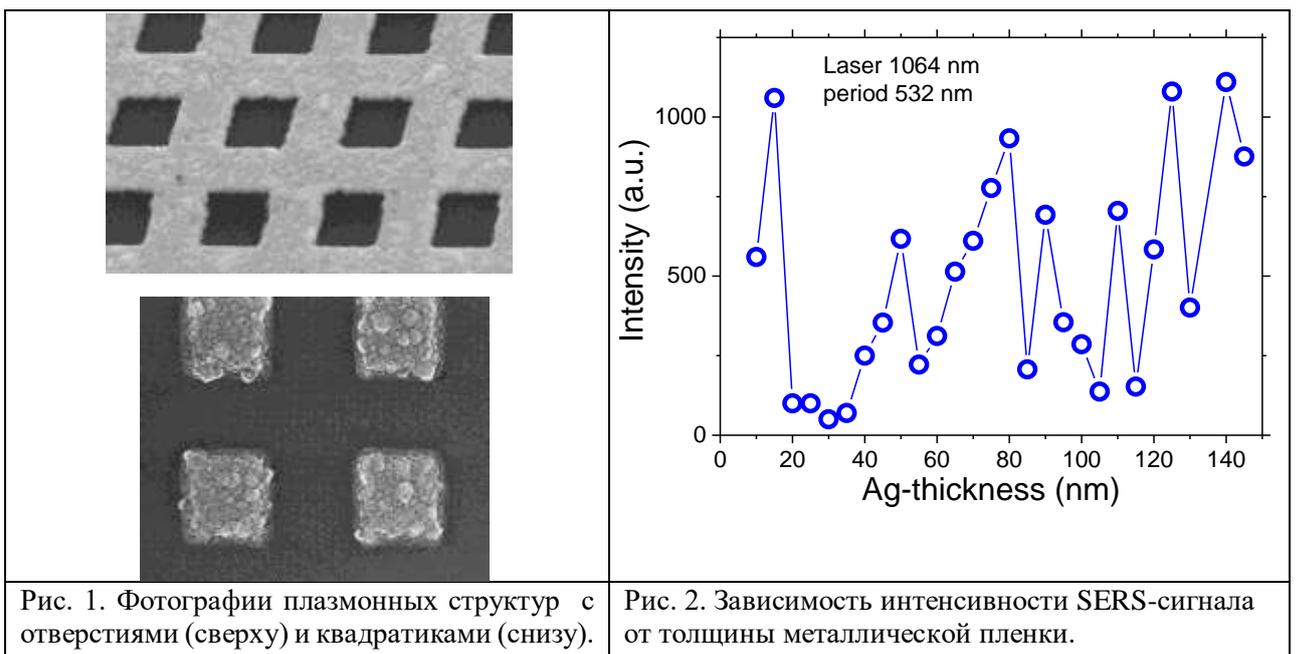
Обнаружение осцилляций гигантского усиления интенсивности рамановского рассеяния света в периодических плазмонных структурах в зависимости от толщины металлического слоя

Т.Д.Рудаков, А.С.Астраханцева, * С.М.Макаровская, В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин

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

*sergeenkova.anka@mail.ru

Хорошо известно, что в однородных металлических пленках невозможно наблюдать эффект гигантского усиления интенсивности неупругого рассеяния света (SERS-эффект), что связано с невозможностью возбудить светом плазменные волны в пленке, поскольку нельзя выполнить требования законов сохранения энергии и импульса. Однако, если в металлической пленке сделать, например, периодическую структуру отверстий, то в этом случае плазменные волны можно возбуждать и при этом их волновой вектор будет определяться периодом системы отверстий. Нами было показано, что в металлических пленках с периодическими отверстиями (размер квадратного отверстия составлял половину периода, см. рис. 1а) наблюдается эффект гигантского усиления интенсивности неупругого рассеяния света, причем коэффициент усиления значительно зависит от толщины металла (серебра). Обнаружено, что при изменении толщины серебряной пленки в диапазоне от 5 нм до 145 нм наблюдаются сильные осцилляции коэффициента усиления, амплитуда которых достигает 30 раз (см. рис. 2). Показано, что обнаруженные осцилляции зависят от периода исследованных структур и длины волны лазера. Обнаруженные осцилляции объясняются в терминах резонансного возбуждения стоячих плазменных волн в металлических пленках. При этом важным фактором является то, что скорость и дисперсия плазменных волн сильно зависят от толщины металлической пленки. Исследован также обратный случай периодических структур с металлическими квадратиками, размер которых равен половине периода структуры (рис. 1б), и показано, что и в этом случае наблюдаются осцилляции гигантского усиления интенсивности неупругого рассеяния света от толщины металла.



Исследования спин-фононного взаимодействия в магнитных топологических изоляторах MnBi_2Te_4 и MnSb_2Te_4 методом спектроскопии комбинационного рассеяния света

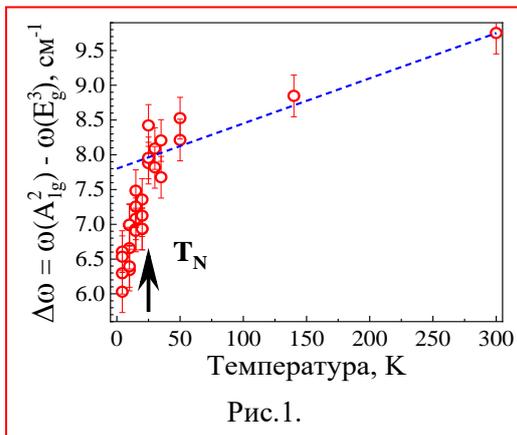
А.А.Максимов,^{1*} И.И. Тартаковский,¹ Н.А.Абдуллаев,² В.Н.Зверев¹

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

²Бакинский государственный университет, AZ1148, Баку, Азербайджан;
Институт физики, AZ1141, Баку, Азербайджан

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

В работе были подробно изучены спектры комбинационного рассеяния (КР) света в кристаллах магнитных топологических изоляторов в широком диапазоне температур, включающем область магнитного упорядочения, определены ангармонические параметры изученных кристаллов, обсуждается возможное влияние спин-фононного взаимодействия на частоты и интенсивности КР фононов.



Измерения спектров КР с высокой точностью определения спектрального положения полос КР света [1], в отличие от работ [2,3] с противоречивыми экспериментальными утверждениями, показали, что с точностью до $\pm 0.1 \text{ cm}^{-1}$ температурная зависимость частоты $A_{1g}^{(1)}$ фонона в MnBi_2Te_4 может быть описана стандартной ангармонической моделью, не учитывающей спин-фононного взаимодействия.

Также были измерены спектры КР кристаллов MnBi_2Te_4 с высоким спектральным разрешением при различных температурах при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны

излучения 785 нм, что позволило впервые подробно изучить температурное поведение $A_{1g}^{(2)}$ фонона. Наблюдается увеличение относительной интенсивности и сильное уменьшение частоты (рис. 1) $A_{1g}^{(2)}$ фонона по сравнению с интенсивностью и частотой фонона $E_g^{(3)}$ в MnBi_2Te_4 при понижении температуры ниже температуры антиферромагнитного фазового перехода T_N . Такое температурное поведение можно объяснить спин-фононным взаимодействием, которое наиболее сильным образом должно проявляться именно для фонона $A_{1g}^{(2)}$ симметрии [2].

Исследования поляризационных зависимостей спектров КР света в кристаллах MnSb_2Te_4 свидетельствуют в пользу того, что в них, в отличие от изоструктурных кристаллов MnBi_2Te_4 , происходит значительное перемешивание атомов Sb и Mn.

Литература

- [1] А.А. Максимов, И.И. Тартаковский, З.С. Алиев *и др.*, Письма в ЖЭТФ **118**, 361 (2023).
[2] Н. Padmanabhan, М. Poore, Р.К. Kim *et al.*, Nat. Commun. **13**, 1929 (2022).
[3] J. Choe, D. Lujan, М. Rodriguez-Vega *et al.*, Nano Lett. **21**, 6139 (2021).

Оптические исследования экситонных состояний в перовските CsPbBr₃**С.Н.Терешко,* А.А.Деменев, В.Д.Кулаковский***ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: tereshko.sn@phystech.edu*

Перовскиты – класс трёхкомпонентных полупроводников со структурой CaTiO₃, являющихся предметом значительного научного интереса в последние 15 лет. Этот интерес вызван возможностью их эффективного использования в различных оптоэлектронных и фотовольтаических устройствах, благодаря сравнительно высоким длинам свободного пробега и высоким показателям квантового выхода и поглощения в оптической области длин волн [1].

В работе исследованы экситонные состояния в монокристаллах CsPbBr₃. С этой целью в экситонной области спектра были измерены поляризованные спектры фотолюминесценции (ФЛ) с временным разрешением и отражения. Для исследования спектров отражения использовался белый светодиод, для ФЛ использовался перестраиваемый Ti:Sp лазер с длительностью импульса ~3 пс, работающий на длине волны 850 нм и удвоитель частоты. Для записи спектров использовались монохроматор, стрип камера и CCD-камеры, позволявшие получать разрешение до 40-50 мкэВ и до 10 пс. Для изучения влияния магнитного поля, образцы были помещены в криостат со сверхпроводящим соленоидом с магнитным полем до 6 Тл. Измерения выполнялись в геометрии Фарадея при температуре ~2К.

В ходе предыдущих исследований образца схожего перовскита, легированного эрбием, возникли вопросы, относительно того, какой вклад в свойства полупроводника вблизи частоты экситона вносят атомы эрбия. Выяснилось, что энергия экситона и позиция линии ФЛ немного сдвинулись, однако величины продольно-поперечного расщепления экситонного состояния, расщепления линейных поляризаций в нулевом поле, вызванных симметрией кристалла, и величина экситонного g-фактора практически не изменились. Помимо этого, были проведены времязрешённые измерения ФЛ в нелегированных образцах CsPbBr₃. В отличие от легированных образцов, здесь наблюдалось расщепление двух спектров с различной циркуляцией в магнитном поле. Однако, зеемановское расщепление оказалось значительно меньшим, чем то, что наблюдается в спектрах отражения. В настоящий момент мы исследуем причины такого различия в g-факторах у свободных и связанных электронов.

Образцы были синтезированы в лаборатории “Фотоактивные нанокompозитные материалы” СПбГУ. Выражаем благодарность А.В. Емелину и А.В. Шурухиной за предоставленные образцы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] Amrita Dey et al. , ACS Nano, 15 (7), 10775-10981 (2021).

Эффект Парселла для плазмонов в двумерной системе с задним затвором

И.В.Андреев,* В.М.Муравьев, И.В.Кукушкин*ИФТТ РАН, 142432, г. Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***andreev@issp.ac.ru*

Двумерная плазмоника имеет большую актуальность в качестве связующего звена между электроникой и фотоникой. С одной стороны, для плазмонов может быть реализован режим сильного взаимодействия с электромагнитными волнами [1], что позволяет использовать плазмонные элементы для управления световыми пучками [2]. С другой стороны, плазмонами можно электрически управлять (например, при помощи затворов), и преобразовывать переменное поле плазмонов в сигналы постоянного напряжения и тока. Это делает актуальным исследование различных методов и подходов инженерии плазмон-фотонного взаимодействия. В квантовой оптике одним из ярких примеров такой инженерии является эффект Парселла [3], при котором скорость излучательного распада возбужденного состояния квантовой системы определяется свойствами мод резонатора, в который помещена излучающая система.

В данной работе исследуется изменение излучательного распада плазменного резонанса в высокоподвижной двумерной электронной системе на базе квантовой ямы GaAs/AlGaAs, связанной с резонатором. Роль открытого резонатора играет полупроводниковая подложка, на противоположную двумерной системе сторону которой нанесён хорошо проводящий задний затвор, играющий роль металлического зеркала. Изменяя толщину подложки, можно перестраивать частотное положение собственных мод резонатора.

Установлено, что излучательная ширина линии плазменного резонанса в дисках двумерной электронной системы существенно немонотонным образом зависит от частоты, демонстрируя ряд максимумов. Максимумы излучательной ширины линии плазменного резонанса перестраиваются с изменением толщины подложки, и связаны с фотонными резонансами Фабри-Перо в подложке с задним затвором. Это свидетельствует о наблюдении для классической системы – плазмонов в диске – аналога эффекта Парселла, при котором излучательная ширина резонанса в системе модулируется плотностью собственных мод резонатора.

Литература

- [1] V.M.Muravev, I.V.Andreev, I.V.Kukushkin, S.Schmult, and W.Dietsche, Phys. Rev. B 83, 075309 (2011).
- [2] V.M.Muravev, A.Shuvaev, A.S.Astrakhantseva, P.A.Gusikhin, I.V.Kukushkin, A.Pimenov, Appl. Phys. Lett. 121, 051101 (2022).
- [3] E.M.Purcell, Phys. Rev. 69, 681 (1946).

Обнаружение новой двумерной плазменной моды в разрезном кольцевом резонаторе

А.С.Казаков^{1,2*} И.В.Андреев,¹ В.М.Муравьев,¹ И.В.Кукушкин¹

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

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141700 Долгопрудный, Россия*

**e-mail: askazakov@physics.msu.ru*

В настоящее время особый интерес к исследованию плазменных резонансов в двумерных электронных системах (ДЭС) обусловлен интенсивным развитием науки об искусственно синтезируемых метаматериалах и их двумерных аналогах – метаповерхностях – позволяющих на этапе проектирования заложить в материал требуемый электромагнитный отклик. Практически важной задачей является разработка метаматериала, позволяющего достичь контролируемого сдвига фазы проходящей электромагнитной волны в широких пределах – от 0 до 2π , что может быть обеспечено за счет наложения двух резонансов различной природы – электродипольного и магнитодипольного – естественно возникающих, например, в структуре разрезного кольцевого резонатора [1]. В текущей работе исследованы двумерные плазменные возбуждения в планарных мезоструктурах, имеющих форму разрезного кольцевого резонатора с различными геометрическими параметрами.

Исследуемые образцы представляли из себя гетероструктуры на основе квантовой ямы GaAs/AlGaAs. Концентрация высоко подвижных носителей заряда в ДЭС при $T = 4,2$ К составляла порядка $n = 2 \cdot 10^{11}$ см⁻². Мезоструктуры в форме разрезного кольцевого резонатора и симметричного кольца с различными геометрическими параметрами были изготовлены посредством фотолитографии с последующим химическим травлением. Плазменные резонансы в ДЭС возбуждались электромагнитным излучением с частотой до 90 ГГц, подводимым по коаксиальной согласованной линии. Регистрация плазменных возбуждений производилась посредством оптической методики, основанной на высокой чувствительности спектра рекомбинантной фотолюминесценции ДЭС к микроволновому разогреву [2].

Спектральный состав плазменных возбуждений в разрезном кольцевом резонаторе отличается от набора плазменных мод в кольцевой симметричной структуре наличием дополнительного, низкочастотного по отношению к фундаментальной моде, плазменного резонанса. Непосредственная связь дополнительной плазменной моды и нарушения симметрии в структуре разрезного кольцевого резонатора подтверждается подавлением указанной моды в условиях продольной поляризации электрического поля падающей электромагнитной волны по отношению к разрезу. Кроме того, показано, что положение дополнительного резонанса обратным корневым образом зависит от продольного размера щели в разрезном кольцевом резонаторе. Полученные экспериментальные результаты хорошо описываются в рамках модели эквивалентной электрической схемы, состоящей из сосредоточенных элементов, а также согласуются с численными расчетами.

Литература

- [1] Pendry J. B. *et al.* IEEE transactions on microwave theory and techniques, 47 (11), 2075 (1999).
 [2] Muravev V. M. *et al.* Physical Review B, 93 (4), 041110 (2016).

Взаимодействие околзатворных плазмонов в многозатворных 2D электронных системах

В.А.Волков*

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

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

Недавно было предсказано и обнаружено новое семейство плазмонов в двумерной (2D) электронной системе с металлическим затвором в форме полосы конечной ширины («околзатворные» плазмоны) [1], [2]. В работе [1] свойства плазмонов теоретически исследовались в системах с частичным экранированием с помощью приближенного решения довольно сложного интегрального уравнения. В настоящей работе развит новый аналитический подход к решению указанного уравнения, позволяющий учесть нелокальное взаимодействие плазмонов, обусловленное боковыми силами изображения в многозатворных 2D системах.

Рассмотрена система, содержащая несколько затворов в форме одинаковых параллельных металлических полос. Показано, что плазмоны, локализованные у разных затворов, могут взаимодействовать как напрямую (кулоновское взаимодействие типа затвор-затвор), так и косвенным образом, через посредника, роль которого играет 2D электронный газ. Сила этих двух механизмов сравнима между собой. Аналитически найден спектр околзатворных плазмонов в вышеуказанных условиях.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

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

Плазмоны в латерально ограниченных анизотропных сильно экранированных двумерных электронных системах

И.В.Загороднев,¹ Д.А.Родионов^{1,2}

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

²*МФТИ, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9*

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

В последнее время растет интерес к анизотропным двумерным электронным системам и к плазменным колебаниям в них. В частности, обсуждается уникальная возможность управления направлением распространения плазмонов в 2D электронных системах с анизотропной проводимостью [1], например, в квантовых ямах на основе напряженного Al(Ga)As, которые, с одной стороны, обладают высокой подвижностью при низких («гелиевых») температурах, а с другой стороны, анизотропия в них легко контролируема и очень чувствительна к внутрислойной деформации квантовой ямы [2].

В данной работе, являющейся продолжением публикаций [3-4], рассмотрены плазменные колебания, возникающие в латерально ограниченных анизотропных двумерных (2D) электронных системах на примере двух геометрий – полоса и диск – в том числе в ситуации, когда важны эффекты электромагнитного запаздывания. Предполагается, что рядом с 2D системой находится металлический идеально проводящий электрод (затвор). В пределе, когда электрод расположен на расстоянии много меньшем характерной длины волны плазменных колебаний, возможно точное решение, как в диске, так и в полосе (в рамках приближения локальной ёмкости). Интересно, например, что в таком случае затухание плазменных резонансов в таких системах обычно меньше, чем темп релаксации носителей, т.е. обратное время рассеяния. Однако, в теории в этом предельном случае отсутствует радиационное затухание, которое может быть важно в системах с высокой подвижностью носителей заряда, например, в квантовых ямах GaAs/AlGaAs при низких температурах. Радиационное затухание может быть учтено, например, в рамках теории возмущений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

- [1] S. Ahn, S. Das Sarma, Phys. Rev. B 103, L041303 (2021).
- [2] A.R. Khisameeva, V.M. Muravev, I.V. Kukushkin et al., Appl. Phys. Lett. 117, 093102 (2020).
- [3] Д.А. Родионов, И.В. Загороднев, Письма в ЖЭТФ 118, 90 (2023).
- [4] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials 13, 975 (2023).

Магнитоэкситонный конденсат в квантово-холловском диэлектрике: фазовая диаграмма

**А.В.Горбунов,^{1*} П.С.Бережной,^{1,2} А.С.Кореев,^{1,3} В.В.Соловьев,¹ Л.В.Кулик,¹
В.Б. Тимофеев¹**

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

²НИУ Высшая школа экономики, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д.11

³МФТИ (НИУ), 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9

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

Триплетные циклотронные магнитоэкситоны (ТЦМЭ) в квантово-холловском диэлектрике (фактор заполнения $\nu = 2$) образованы неравновесной электронной вакансией (ферми-дыркой) на полностью заполненном нулевом электронном уровне Ландау и возбужденным электроном с перевернутым спином на пустом первом уровне Ландау [1, 2]. ТЦМЭ – это низжайшие по энергии возбуждения [2, 3] и, кроме того, композитные бозоны со спином $S = 1$ и долгим временем жизни – до 1 мс [4]. При температуре $T \lesssim 1$ К и концентрации $n_{ex} \sim (1 - 10)\%$ от плотности квантов магнитного потока в ансамбле ТЦМЭ формируется новое состояние электронной материи – *магнитофермионный* (магнитоэкситонный) конденсат [4] – экспериментальный пример конденсации композитных бозонов в пространстве обобщенных импульсов.

ТЦМЭ – «темные» квазичастицы, не взаимодействующие с электромагнитным полем в дипольном приближении, и основной способ их обнаружения – фотоиндуцированное резонансное отражение (ФРО) света, соответствующего оптическому переходу «0–0» между состояниями нулевых уровней Ландау тяжелой дырки в валентной зоне и электрона в зоне проводимости. Методом ФРО детектируются неравновесные ферми-дырки, входящие в состав ТЦМЭ. При фиксированной плотности мощности P_{pump} фотовозбуждения из валентной зоны на более высокие электронные уровни Ландау плавное понижение T ниже 1 К приводит к скачкообразному увеличению амплитуды ФРО, что связано с формированием конденсированного состояния. Варьирование P_{pump} и T позволило нам ранее построить фазовую диаграмму перехода «газ-конденсат» в координатах «температура – плотность мощности» в диапазоне $0.53 \lesssim T \lesssim 0.85$ К [4]. Теперь за счет использования криостата растворения удалось определить фазовую границу в диапазоне $0.04 \lesssim T \lesssim 0.85$ К. Обнаружено, что при $0.04 \lesssim T \lesssim 0.6$ К связь P_{pump} с температурой на границе перехода близка к линейной, а при $T > 0.6$ К наблюдается сильный сверхлинейный рост. Очевидно, что при $n_{ex} \gtrsim 10\%$ от плотности квантов магнитного потока ферми-дырка становится плохо определенным зарядовым возбуждением, и нужно говорить о возбужденных электронах, а не о связанных в ТЦМЭ электрон-дырочных парах. Т.е. обсуждать вид фазовой границы имеет смысл только при $T < 0.6$ К, причем физический смысл имеет граница в координатах « $T - n_{ex}$ ». При стационарной накачке $n_{ex} \sim P_{pump} \tau$, где τ – время жизни ТЦМЭ. Измеренная в диапазоне $0.04 \lesssim T \lesssim 0.6$ К зависимость $\tau(T)$ демонстрирует линейное спадание с температурой, и произведение $P_{pump}(T)\tau(T)$ остается фактически постоянным. Таким образом, на границе перехода n_{ex} не меняется с температурой – магнитоэкситонный конденсат ведет себя как несжимаемая жидкость.

Литература

- [1] M. A. Eriksson, A. Pinczuk, B. S. Dennis et al., Phys. Rev. Lett. 82, 2163 (1999).
- [2] L.V. Kulik, I.V. Kukushkin, S. Dickmann et al., Phys. Rev. B 72, 073304 (2005).
- [3] S. Dickmann, I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 71, 241310 (2005).
- [4] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, S. Dickmann et al., Nature Commun. 7, 13499 (2016).

Параметрическое рассеяние экситонных поляритонов в микрорезонаторе с пониженной вращательной симметрией

А.А.Деменев,^{1*} С.Н.Терешко,¹ С.С.Гаврилов,¹ В.Д.Кулаковский^{1,2}

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

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

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

В работе [1] было теоретически показано, что в резонансно накачиваемой бистабильной экситон-поляритонной системе в высокочастотном микрорезонаторе (МР) с пониженной вращательной симметрией может возникать петлевое параметрическое рассеяние из возбуждаемого состояния нижнего поляритона (НП) в Γ -точке. Для проверки существования рассеяния исследовалась поляритонная система в микростолбиках (планарный размер 60×60 мкм²) на основе высокочастотного 2λ -GaAs/AlAs-МР, возбуждаемая резонансной непрерывной циркулярной накачкой лазером с $\hbar\omega_{\text{las}} = E_{\text{LP}}(k=0) + \Delta_{\text{las}}$, где $\Delta_{\text{las}} = 0,09$ мэВ, по нормали к плоскости МР.

Было найдено, что при переходе мощности накачки через пороговое значение $P_{\text{las}} = P^* \approx 95$ мВт (при диаметре пятна накачки в 40 мкм) кардинально менялось НП распределение в обратном пространстве: резко возрастало заполнение 4-х областей НП состояний с $|\mathbf{k}_{x,y}| \approx 0.38$ мкм⁻¹ при малом увеличении P_{las} (рис.1а). Подобная динамика k -пространства существенно отличается от бистабильного перехода для планарного МР, когда усиливается только накачиваемая НП мода с $k=0$ (рис.1б). Анализ спектров показал, что суммарная заселённость 4-х рассеянных мод с $k \neq 0$ возрастает в ~ 4.3 раза при превышении P^* на 25% (рис.1с), при этом, заполнение накачиваемой моды с $k=0$ возрастает лишь в ~ 1.8 раза. Таким образом, увеличение $P_{\text{las}} \geq P^*$ запускало параметрический распад накачиваемой НП моды в конденсатные состояния с $k \neq 0$ из областей k -пространства, задаваемых исходной расстройкой Δ_{las} .

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

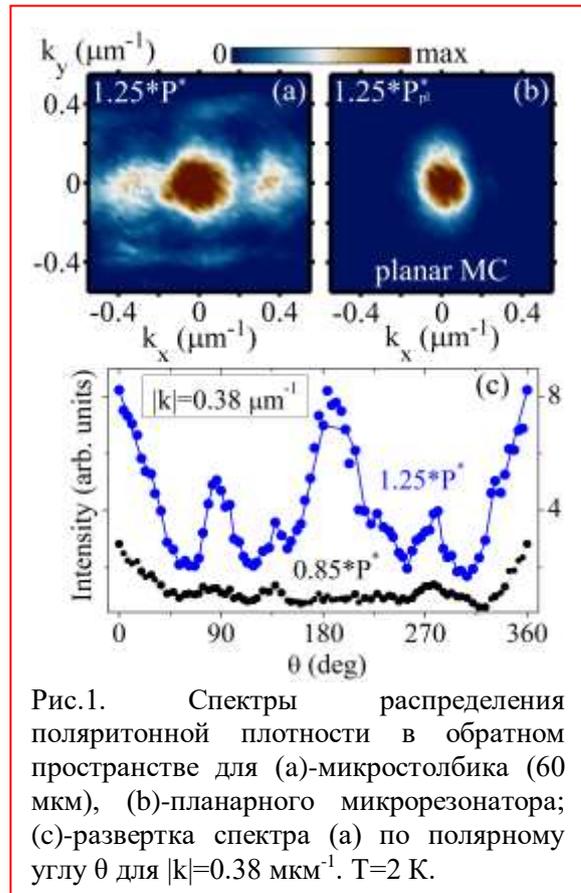


Рис.1. Спектры распределения поляритонной плотности в обратном пространстве для (а)-микростолбика (60 мкм), (б)-планарного микрорезонатора; (с)-развертка спектра (а) по полярному углу θ для $|\mathbf{k}|=0.38$ мкм⁻¹. $T=2$ К.

Литература

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

Оптическая мультистабильность экситонных поляритонов в размерно-квантованном резонаторном микростолбике

Н.Н.Ипатов,* С.С.Гаврилов

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

**nnipatov@gmail.com*

Экситонные поляритоны, возбуждаемые резонансной световой волной в полупроводниковом микрорезонаторе, образуют когерентные состояния. Если система латерально ограничена и возбуждается вблизи основного уровня размерного квантования, то при достаточно малом размере мезы (2-3 мкм для резонаторов на основе GaAs) ее поведение может быть описано в рамках эффективно одномерной (квазиульмерной) модели. Хорошо известно, что благодаря оптической мультистабильности [1,2], вызванной поляритон-поляритонным взаимодействием, в квазиульмерной поляритонной системе удастся реализовать чрезвычайно быстрые управляемые переключения между стационарными состояниями с различными амплитудами и/или поляризациями. Недавно сообщалось, что помимо стационарных (мультистабильных) могут также существовать нестационарные (автоколебательные или хаотические) состояния поляритонов [3,4].

В настоящем докладе теоретически рассматриваются оптическая мультистабильность и связанные с ней явления в менее изученном случае, когда возбуждается сразу несколько уровней размерного квантования поляритонов. Рассматривается круглая резонаторная меза на основе GaAs диаметром 10 мкм. Мы нашли, что с ростом амплитуды возбуждения в определенных условиях может происходить серия переходов от стационарных к автоколебательным и далее хаотическим состояниям поляритонной системы. В частности, в линейном режиме реализуются стационарные состояния, обладающие полной вращательной симметрией, однако с увеличением амплитуды возбуждения они оказываются параметрически неустойчивыми относительно рассеяния в новые пространственные моды с пониженной симметрией (C_2) и отличными частотами, что сопровождается переходом к автоколебаниям. Дальнейшее понижение симметрии в результате вторичных эффектов параметрического рассеяния переводит систему к состоянию динамического хаоса, характеризующемуся квазинепрерывным спектром излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-00455.

Литература

- [1] N. A. Gippius *et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 236401 (2007).
- [2] С. С. Гаврилов, Усп. физ. наук 190(2), 137 (2020).
- [3] S. S. Gavrilov, Phys. Rev. B 106, 045304 (2022).
- [4] С.С. Гаврилов, Н.Н. Ипатов, В.Д. Кулаковский, Письма в ЖЭТФ 118, 9 (2023).

Влияние потенциала беспорядка на динамику резонансно возбужденных некогерентных экситонных поляритонов в высокодобротных GaAs микрорезонаторах

А.А.Демнев,* С.Н.Терешко, Н.А.Гиппиус, В.Д.Кулаковский

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

*e-mail: demenev@issp.ac.ru и

Конденсация экситонных поляритонов (ЭП) в планарных микрорезонаторах (МР) широко изучена при межзонном возбуждении, когда конденсат на дне поляритонной зоны образуется вследствие стимулированного рассеяния экситонов из долгоживущего экситонного резервуара. Однако, исследования конденсации ЭП в отсутствие экситонного резервуара из-за большого времени их энергетической релаксации стали возможны лишь недавно, после появления высокодобротных МР с временем жизни ЭП $\tau_{LP} > 100$ пс. В работах [1,2] было показано, что процесс конденсации частиц в бозонной системе имеет три стадии: релаксация в когерентную область, где кинетическая энергия частицы E_{kin} имеет порядок ее энергии взаимодействия E_{int} с другими частицами, формирование “квазиконденсата” (сглаживание колебаний плотности) и, затем, “истинного конденсата” с установлением дальнего порядка.

В настоящей работе исследовано влияние потенциала беспорядка на динамику ЭП в импульсном (k-) пространстве и формирование пространственной когерентности в изначально некогерентной ЭП системе в высокодобротном 2λ -GaAs/AlAs МР с $In_{0.05}Ga_{0.95}As$ квантовыми ямами при резонансном возбуждении пс импульсами с большой угловой апертурой ($\sim 22^\circ$) без возбуждения экситонного резервуара. Лазерные импульсы генерировали ЭП систему выше дна нижней поляритонной ветки на 0.2 – 0.7 мэВ при 2 К с плотностью до $n \sim 10^{11}$ см⁻², превышающей пороговую для Бозе-конденсации ЭП на 3.5 порядка.

Найдено, что в присутствии случайного потенциала распределение возбужденных ЭП в k-пространстве быстро стабилизируется, хотя система ещё далека от теплового равновесия. Распределение хорошо описывается в рамках линейных уравнений Шрёдингера с учетом только потенциала беспорядка (δE_{LP}) и конечного τ_{LP} вплоть до плотностей $\sim 10^{11}$ см⁻² в газе ЭП с энергией межчастичного взаимодействия E_{int} , меньшей $0.2\delta E_{LP}$ и $0.1 < E_{kin} >$. В то же время влияние межчастичного взаимодействия на формирование пространственной когерентности при $E_{int} \approx 0.2\delta E_{LP}$ уже весьма существенно: в МР с $\delta E_{LP} = 0.15$ мэВ в ЭП системе с $n = 7 \times 10^{10}$ см⁻² ($E_{int} \sim 0.03$ мэВ) длина когерентности L_c при $t = 160$ пс возрастает до 5.3 мкм, тогда как в классическом некогерентном Бозе-газе ЭП с таким же распределением в k-пространстве она равна 3.6 мкм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] Yu.M. Kagan, B.V. Svistunov, and G.V. Shlyapnikov, Sov. Phys. JETP, **75**, 387 (1992).
 [2] Yu. Kagan and B.V. Svistunov, Sov. Phys. JETP, **78**, 187 (1994).

Гигантское перераспределение плотности электронов поперек широкой квантовой ямы GaAs при их конденсации на нижний уровень Ландау

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

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

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

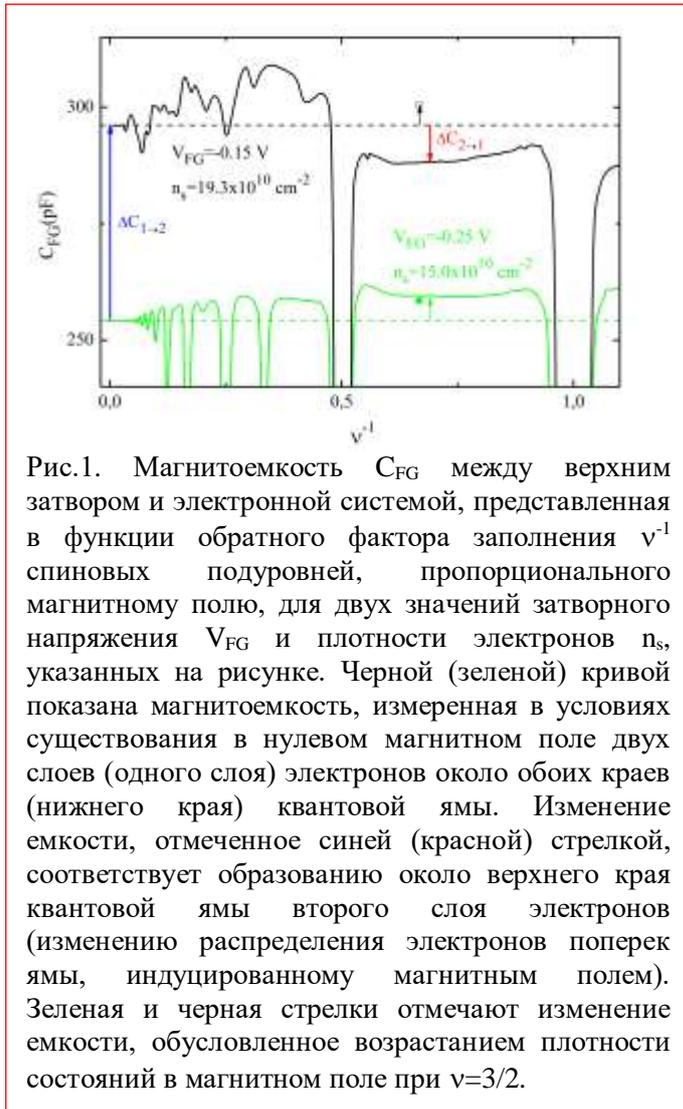


Рис.1. Магнитоёмкость C_{FG} между верхним затвором и электронной системой, представленная в функции обратного фактора заполнения ν^{-1} спиновых подуровней, пропорционального магнитному полю, для двух значений затворного напряжения V_{FG} и плотности электронов n_s , указанных на рисунке. Черной (зеленой) кривой показана магнитоёмкость, измеренная в условиях существования в нулевом магнитном поле двух слоев (одного слоя) электронов около обоих краев (нижнего края) квантовой ямы. Изменение ёмкости, отмеченное синей (красной) стрелкой, соответствует образованию около верхнего края квантовой ямы второго слоя электронов (изменению распределения электронов поперек ямы, индуцированному магнитным полем). Зеленая и черная стрелки отмечают изменение ёмкости, обусловленное возрастанием плотности состояний в магнитном поле при $\nu=3/2$.

В полевых транзисторах с двумя затворами, расположенными по разные стороны проводящего канала, создаваемого в широкой (50 нм) квантовой яме GaAs, обнаружено гигантское перераспределение плотности электронов поперек квантовой ямы, индуцируемое магнитным полем, перпендикулярным к плоскости канала, и происходящее при переходе всех электронов на нижний уровень Ландау (черная кривая на рис.1). Переход сопровождается изменением конфигурации электронной системы из двухслойной, образованной двумя слоями электронов, расположенными около противоположных стенок квантовой ямы в слабых магнитных полях, в одно-слойную в сильных. Исследования выполнены при помощи оригинальной ёмкостной методики [1], дающей прямую информацию о положении зарядов в квантовой яме. Объяснение наблюдаемого эффекта требует последовательного учета электрон-электронного взаимодействия и, по-видимому, невозможно в рамках существующих аналитических подходов. Анализируются подходы к расчету

подзон размерного квантования, основанные на приближениях Хартри и функционала плотности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 22-22-00753 (завершен) и 24-22-00312.

Литература

- [1] S.I. Dorozhkin, A.A. Kapustin, I.B. Fedorov, V. Umansky, K. von Klitzing, J.H. Smet, J. Appl. Phys. 123, 084301 (2018).

Корреляционная и обменная энергия сильнокоррелированной двумерной электронной системы в ультраквантовом пределе

А.С.Кореев¹, А.Б.Ваньков^{1,2}, П.С.Бережной^{1,2}, И.В.Кукушкин^{1,2}

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

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

Структура экзотической двумерной электронной системы (ДЭС) в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) зависит не только от ее уникальной топологии, но также от сочетания различных энергетических параметров. Пространственное упорядочение определяется значением корреляционной энергии, в то время как спиновые конфигурации – обменной энергией. В ультраквантовом пределе свойства состояний дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ) $\nu < 1$ определяются, прежде всего, величиной корреляционной щели. Её величина может проявляться во внутреуровневой волне зарядовой плотности (CDW) и в комбинированных с ней возбуждениях.

Для эффективного зондирования энергии хорошо подходят методы оптической спектроскопии [1,2]. В данной работе энергетические параметры были исследованы путём измерения дисперсии коллективных возбуждений. Низкотемпературные эксперименты по неупругому рассеянию света (НРС) проводились на гетероструктуре MgZnO/ZnO с концентрацией электронов в двумерном канале равной $1.15 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

В результате были исследованы энергии и дисперсии двух возбуждений – спинового экситона (SE) и новой рамановской линии (SR) (рис. 1). Энергия второй линии отличается от одночастичной зеемановской и имеет величину, сопоставимую с корреляционной энергией CDW. Экспериментально было показано, что оно является комбинированным возбуждением спиновой плотности.

Измерение обменного дисперсионного вклада в энергию спиновых экситонов помогло установить зависимость спиновой конфигурации ДЭС от фактора заполнения в ультраквантовом пределе. В частности, состояние $\nu=1/3$ имеет ожидаемый ферромагнитный порядок, а состояние $\nu=2/3$ напротив – не обладает ферромагнитной спиновой жесткостью. Это указывает на нарушение электрон-дырочной симметрии из-за сильного смешивания уровней Ландау.

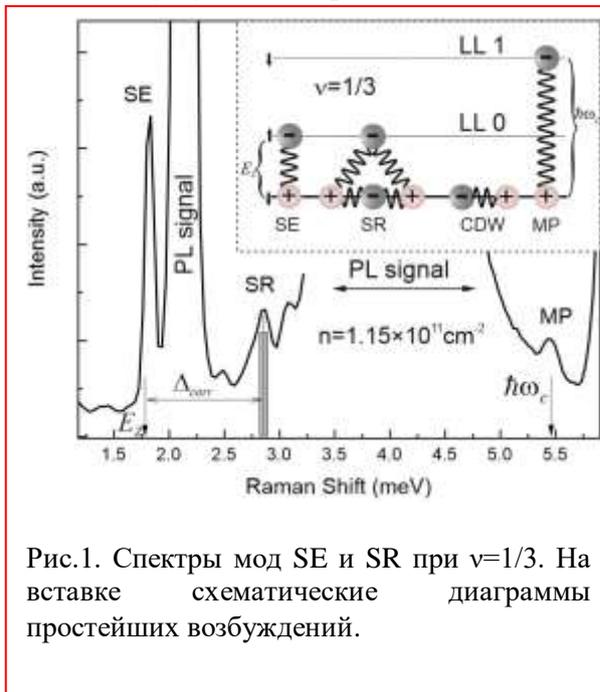


Рис.1. Спектры мод SE и SR при $\nu=1/3$. На вставке схематические диаграммы простейших возбуждений.

Литература

- [1] A. Pinczuk, B. S. Dennis, L. N. Pfeiffer, and K. West, Phys. Rev. Lett. 70, 3983 (1993).
 [2] A. B. Van'kov and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B. 102, 235424 (2020).

Изучение временной динамики сигнала фотоотражения при дробном факторе заполнения $\nu=1/3$ в секундном диапазоне

А.В.Ларионов,* Л.В.Кулик

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

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



Рис.1. Схема установки время-разрешенного фотоотражения.

Исследовалась временная динамика сигнала фотоотражения при дробном ($\nu=1/3$) факторе заполнения двумерных электронов в 17 нм GaAs квантовой яме (КЯ) при гелиевых температурах $T \sim 0.6\text{K}$. Для оптического фото-возбуждения использовался непрерывный полупроводниковый лазер, перестраиваемый по длине волны в диапазоне 750-850 нм. Лазерный пучок модулировался с помощью оптического затвора с контрастностью 1:10, на который подавались импульсы с генератора (DG 645) различной длительностью и скважностью в секундном и субсекундном временном интервале. Регистрация сигнала фото-отражения производилась с помощью быстрого фотодиода, сопряженного с системой счета фотонов. Исследуемый образец с

GaAs КЯ помещался в специальную вставку для конденсации изотопа гелия ^3He , которая находилась внутри гелиевого криостата с соленоидом с изменяемым магнитным полем в диапазоне от 0 до 10 Тл. Конструкция вставки позволяла плавно менять температуру в диапазоне от 0.6 К до 15 К. Держатель образца внутри вставки содержал оптическое окно, через которое заводилось лазерное фотовозбуждение к изучаемому образцу и собирался полезный сигнал. Исследуемый образец монтировался в держателе таким образом, что наклон плоскости квантовой ямы к направлению вектора магнитной индукции составлял 90 градусов.

Ранее нами была обнаружена линия в спектре фотоотражения лафлиновского состояния двумерных электронов ($\nu=1/3$), возникающая при температуре ниже 1К, связанная с формированием сверхдолгоживущих (более 10 с) нейтральных возбуждений с нулевым импульсом (спин-магнитогравитонов) в лафлиновской жидкости [1-3]. В представленном эксперименте изучалась динамика интенсивности этой линии при различной плотности мощности фотовозбуждения лафлиновского состояния (различной плотности спин-магнитогравитонов) в диапазоне периодов импульсов накачки фотовозбуждения от 0.05 до 100 секунд.

Литература

- [1] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozеров, A. B. Vankov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin & V. Y. Umansky, *Nature Commun.* 12, 6477 (2021).
- [2] А. С. Журавлев, Л. В. Кулик, Л. И. Мусина, Е. И. Белозеров, А. А. Загитова, И. В. Кукушкин, *Письма в ЖЭТФ* 114. 474 (2020).
- [3] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, A. V. Larionov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin, *Appl. Phys. Lett.* 123, 083101 (2023).

Возбуждённые состояния экситонов в монослоях MoSe_2 и WSe_2 в спектрах отражения вплоть до комнатной температуры

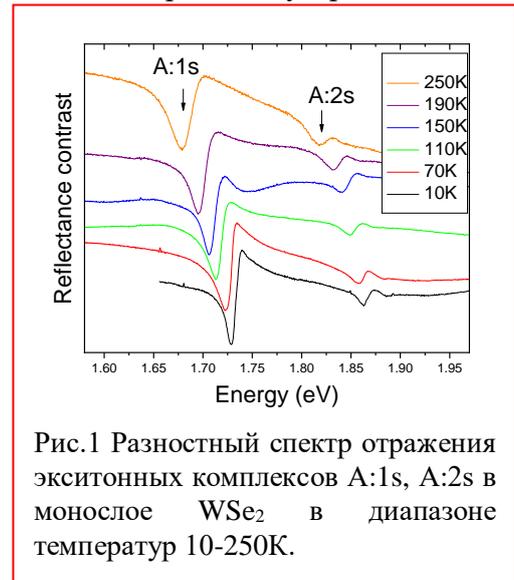
А.С. Бричкин,* Г.М.Голышков, А.В.Черненко, В.Е.Бисти

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

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

Гетероструктуры на основе монослоёв дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляют собой новый класс материалов, привлекающий внимание как перспективный объект для создания на их основе разнообразных оптоэлектронных устройств. Особый интерес в плане практического применения вызывает возможность наблюдать и исследовать различные экситонные комплексы при высоких температурах, вплоть до комнатной. Методика спектроскопии отражения позволяет наблюдать в структурах с монослоями ДПМ не только основное состояние А и В-экситонов А:1s, В:1s, но и возбуждённые состояния А:2s, А:3s, В:2s [1]. В данной работе исследовано поведение этих экситонных комплексов в зависимости от температуры в диапазоне 10К-295К в hBN-инкапсулированных монослоях MoSe_2 и WSe_2 .

При температуре 10К в спектре отражения отчётливо наблюдаются линии экситонов А:1s, В:1s и их возбуждённые состояния: А:2s, А:3s, В:2s, как в монослоях MoSe_2 , так и WSe_2 . Важной особенностью WSe_2 является то, что отщеплённый из-за спин-орбитального взаимодействия В-экситон находится заметно выше по энергии, чем возбуждённые состояния А-экситона А:2s, А:3s [2]. Благодаря этому в WSe_2 все пять упомянутых экситонных линий отделены друг от друга в спектре и хорошо прослеживаются в сериях по температуре, в отличие от MoSe_2 или MoS_2 [1], где В:1s находится близко по энергии к возбуждённым состояниям А:2s, А:3s и их линии перекрываются. С ростом температуры линии уширяются, а их интенсивность падает, тем не менее, даже слабую в исходном разностном спектре линию А:3s удаётся наблюдать в спектре производной вплоть до 110К, а остальные комплексы хорошо видны в исходном спектре по крайней мере до 200К. При более высокой температуре линии В:1s и В:2s настолько уширены, что их представление результатами численного моделирования с использованием формализма метода матриц переноса становится затруднительным. Линии основного А:1s и возбуждённого состояния А:2s хорошо видны в исходном разностном спектре вплоть до температуры 250К (рис. 1) и демонстрируют характерный температурный сдвиг, связанный с изменением ширины запрещённой зоны. Наблюдаемые формы линий спектра отражения экситонных комплексов в монослоях ДПМ определяются толщиной используемых в структуре слоёв hBN и подложки, что находится в хорошем соответствии с применённой численной моделью во всём диапазоне температур, вплоть до комнатной.



При температуре 10К в спектре отражения отчётливо наблюдаются линии экситонов А:1s, В:1s и их возбуждённые состояния: А:2s, А:3s, В:2s, как в монослоях MoSe_2 , так и WSe_2 . Важной особенностью WSe_2 является то, что отщеплённый из-за спин-орбитального взаимодействия В-экситон находится заметно выше по энергии, чем возбуждённые состояния А-экситона А:2s, А:3s [2]. Благодаря этому в WSe_2 все пять упомянутых экситонных линий отделены друг от друга в спектре и хорошо прослеживаются в сериях по температуре, в отличие от MoSe_2 или MoS_2 [1], где В:1s находится близко по энергии к возбуждённым состояниям А:2s, А:3s и их линии перекрываются. С ростом температуры линии уширяются, а их интенсивность падает, тем не менее, даже слабую в исходном разностном спектре линию А:3s удаётся наблюдать в спектре производной вплоть до 110К, а остальные комплексы хорошо видны в исходном спектре по крайней мере до 200К. При более высокой температуре линии В:1s и В:2s настолько уширены, что их представление результатами численного моделирования с использованием формализма метода матриц переноса становится затруднительным. Линии основного А:1s и возбуждённого состояния А:2s хорошо видны в исходном разностном спектре вплоть до температуры 250К (рис. 1) и демонстрируют характерный температурный сдвиг, связанный с изменением ширины запрещённой зоны. Наблюдаемые формы линий спектра отражения экситонных комплексов в монослоях ДПМ определяются толщиной используемых в структуре слоёв hBN и подложки, что находится в хорошем соответствии с применённой численной моделью во всём диапазоне температур, вплоть до комнатной.

Литература

- [1] I. C. Gerber, E. Courtade, S. Shree, C. Robert, et. al. Phys. Rev. B 99, 035443 (2019).
 [2] V.Nan, C.Robert, E. Courtade, M. Manca, et.al. Phys. Rev. X 8, 031073 (2018).

Влияние свободных носителей заряда на экситоны в гетероструктурах с монослоями дихалькогенидов переходных металлов

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

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

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

Экситоны определяют оптические свойства структур с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) так как их энергия связи достигает нескольких сотен мэВ, что позволяет наблюдать экситонные эффекты вплоть до комнатной температуры [1]. Несмотря на это, присутствие свободных носителей заряда существенно влияет на свойства ДПМ структур. Вертикальное электрическое поле является эффективным инструментом управления плотностью носителей заряда в монослоях, что позволяет исследовать их влияние на спектры фотолюминесценции (ФЛ) и отражения. Для изучения этого влияния методом эксфолиации и последовательно переноса были сделаны структуры Graphene-hBN-MoSe₂-hBN-Graphite и Graphene-hBN-WSe₂-MoSe₂-hBN-Graphite на подложке Si/SiO₂. Металлические контакты Gr(50 нм)\Au(250 нм) для приложения вертикального поля были получены термическим напылением.

Изменение плотности электронов в монослое при приложении вертикального поля можно отследить по изменению энергетического расстояния между линиями ФЛ экситонов и трионов, которое меняется пропорционально ферми-энергии электронов, которая, в свою очередь, зависит от величины вертикального поля. Причиной этой зависимости является так называемый «эффект отдачи» при рекомбинации триона, который для соблюдения законов сохранения энергии и квазиимпульса, должен иметь квазиимпульс, равный фермиевскому. Из зависимости расщепления линий экситона и триона от V_g $E_{T-X}(V_g)$ можно получить изменение Ферми энергии электронного газа, которое оказалось равным 5 мэВ при изменении величины поля от -250 ($V_g=-6$ В) до 250 ($V_g=6$ В) кВ/см². Концентрация электронов в монослое при этом изменяется на 4×10^{12} см⁻².

В структурах с двойными квантовыми ямами Graphene-hBN-WSe₂-MoSe₂-hBN-Graphite при определённом пороговом напряжении на обкладках конденсатора происходит резкое переигрывание интенсивности линий внутрислойных экситонов и трионов в узком диапазоне V_g (см. Рис.1), но штарковский сдвиг при этом не наблюдается. Однако при повышении температуры он становится заметен. Такое поведение связано с экранированием внешнего поля свободными носителями заряда, а резкое изменение в поведении экситонов с окончательным разделением носителей заряда по разным монослоям.

Литература

- [1] А. С. Бричкин, Г. М. Голышков, А. В. Черненко ЖЭТФ, 163, 852(2023).

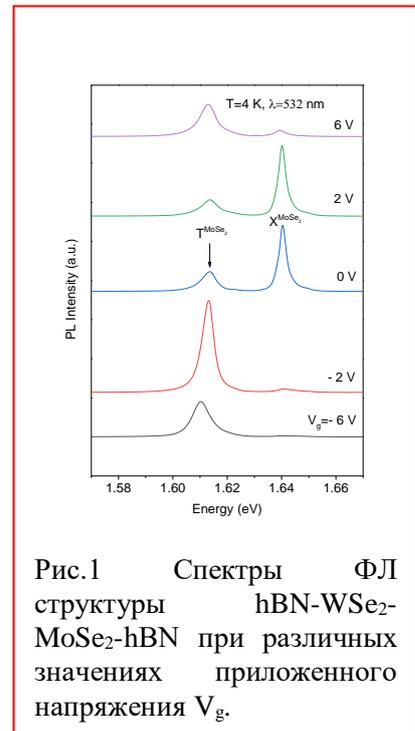


Рис.1 Спектры ФЛ структуры hBN-WSe₂-MoSe₂-hBN при различных значениях приложенного напряжения V_g .

**Ферромагнитный фазовый переход в сильно коррелированных двумерных
электронных системах с псевдоспиновой степенью свободы в условиях
приложенного механического напряжения**

**С.А.Андреева,^{1,2*} А.В.Щепетильников,^{2,1} А.Р.Хисамеева,²
Г.А.Николаев,² И.В.Кукушкин²**

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

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

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

Физика конденсированного состояния насчитывает большое число красивых и сложных явлений, возникающих в системах с сильным электрон-электронным взаимодействием, таких как дробный квантовый эффект Холла, Вигнеровская кристаллизация, Стонеровская неустойчивость. В качестве материальной системы для таких исследований выступает A1As. Большая величина эффективной массы носителей заряда в A1As обуславливает доминирование электрон-электронного взаимодействия над кинетической энергией. Помимо большой эффективной массы интерес к изучению систем на основе A1As объясняется его нетривиальной долинной структурой. Электрон в A1As может находиться в одной из трех эквивалентных долин, что приводит к возникновению новой степени свободы – псевдоспина.

В работе было проведено исследование гетероструктуры с квантовой ямой A1As шириной 15 нм, выращенной в направлении [001] при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии. На поверхности образца была сформирована меза в форме Г-образного мостика Холла, плечи которого были ориентированы вдоль направлений [100] и [010], соответствующих направлениям больших полуосей изоэнергетических поверхностей X и Y долин. Для подведения деформации образец устанавливался на пьезоактуатор с тензометрическим датчиком. Деформация прикладывалась в плоскости двумерной электронной структуры, и величина относительного удлинения достигала $\sim 10^{-4}$. Эксперименты проводились при температуре 0.5 К в постоянном магнитном поле вплоть до 15 Тл.

Приложение деформации снимало вырождение между долинами и позволяло контролируемо и непрерывно изменять их относительное заполнение. При помощи спектроскопии ЭПР было возможно измерить величину относительного долинного заполнения. Анизотропия g-фактора в A1As приводит к тому, что при определенной ориентации образца относительно магнитного поля резонансы от каждой долины имеют разное положение по магнитному полю и хорошо разрешимы. Анализ относительных амплитуд позволил исследовать динамику изменения псевдоспиновой поляризации и определить характер наблюдаемого фазового перехода.

В данной работе был обнаружен и исследован ферромагнитный фазовый переход, связанный с крупномасштабным изменением псевдоспиновой поляризации системы вблизи фактора заполнения 2. Такой переход сопровождался появлением особенности в продольном сопротивлении образца в зависимости от приложенного механического напряжения в фиксированном магнитном поле. Псевдоспиновый характер такого перехода однозначно идентифицируется по изменению относительной амплитуды спиновых резонансов каждой из долин.

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант №20-72-10097).

SERS-детекторы для определения патогенов различного происхождения

А.Ю.Субекин,^{1,2} Т.Е.Пылаев,³ В.И.Кукушкин,² Е.В.Рудакова⁴

¹ *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия*

² *Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия*

³ *Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, 410000 Россия*

⁴ *Институт физиологически активных веществ, Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия*

Современный уровень развития областей народного хозяйства и международных отношений наряду с широким спектром полезных для человечества разработок обуславливает также многие риски. Одним из таких рисков можно считать широкое и неконтролируемое распространение различного рода патогенов. Его причиной может быть как природный, так и антропогенный фактор. В практическом плане это может проявляться в виде инфекционных заболеваний или массовых отравлений населения различными токсинами. В связи с этим на законодательном уровне установлена необходимость постоянной разработки и усовершенствования средств детекции патогенов [1].

В качестве перспективного подхода для реализации средства диагностики заболеваний и патогенов мы видим SERS-детекцию в сочетании с олигонуклеотидными зондами к различным участкам ДНК мишеней.

На этом этапе работы протестировано несколько коллоидов на предмет неспецифической адсорбции различных метаболитов плазмы крови.

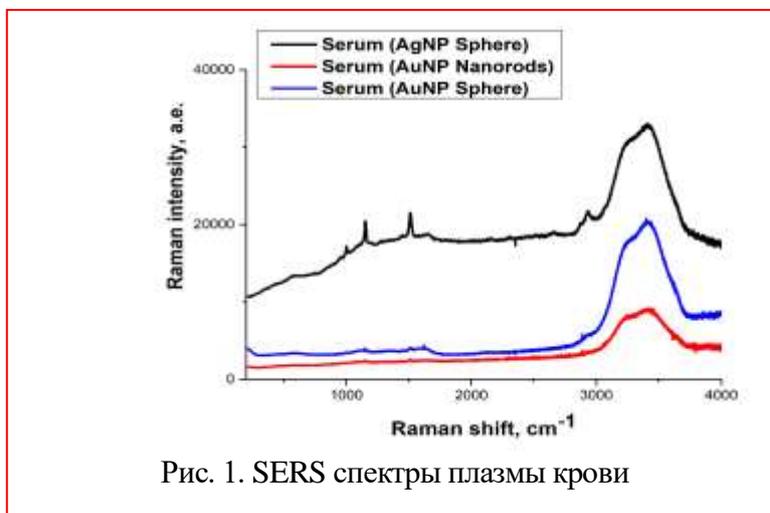


Рис. 1. SERS спектры плазмы крови

Практически полное отсутствие каких-либо линий спектра (кроме резонансно усиленных линий каротиноидов) (рис. 1) может говорить об отсутствии неспецифической адсорбции метаболитов плазмы на наночастицах металлов. Это обстоятельство может быть использовано при модификации этих коллоидов с целью получения зондов для специфического определения различных целевых молекул.

В последующих исследованиях мы будем тестировать олигонуклеотидные зонды на базе этих частиц с SERS-меткой.

Литература

[1] Федеральный закон № 432 от 30 декабря 2020 г.

Исследование резистивных согласованных нагрузок на основе НЛП

И.Ш.Бахтеев,* С.Ю.Молчанов, В.М.Муравьев

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

*e-mail: b1984h@yandex.ru

Коаксиальные нагрузки, предназначенные для поглощения электромагнитной (ЭМ) энергии СВЧ частот, являются одними из основных элементов не только различных систем связи и измерительных систем, но также применяются для калибровки векторных анализаторов цепей (ВАЦ) в стандартных коаксиальных сечениях 7/3,04, 3,5/1,52, 2,92/1,27, 2,4/1,042 и др.

В работе подробно рассмотрен и исследован вариант цилиндрического резистора с разными законами изменения профиля согласования волнового сопротивления. Для этого была построена упрощенная модель коаксиальной нагрузки, включающая только основные элементы. Модель с цилиндрическим резистором представлена на рис. 1.

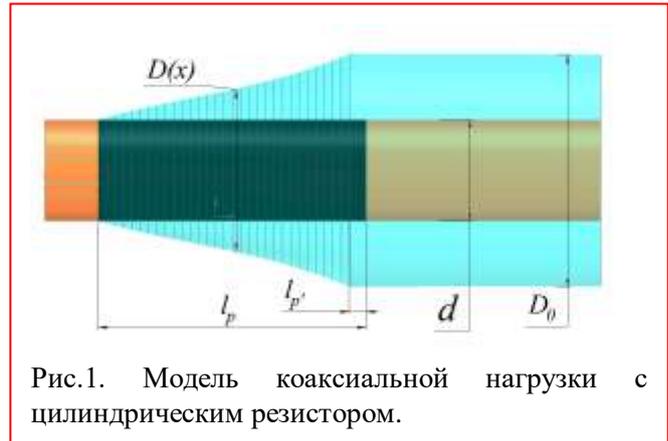


Рис.1. Модель коаксиальной нагрузки с цилиндрическим резистором.

В литературе [1, 2] описаны следующие законы изменения профиля $D(x)$:

1) экспоненциальный:

$$D(x) = d e^{\frac{R(x-l_p')}{60(l_p-l_p')}} \quad (1)$$

где d -диаметр внутреннего проводника, R - сопротивление СВЧ-резистора, равное волновому сопротивлению подводящей линии, l_p - длина резистивного слоя, l_p' - компенсационный зазор.

2) дробно-рациональный:

$$D(x) = \frac{D_0}{1 + \left(\frac{D_0}{d} - 1\right) \left(1 - \frac{x-l_p'}{l_p-l_p'}\right)^2} \quad (2)$$

где D_0 - внешний диаметр проводника

3) линейный:

$$D(x) = D_0 + (d - D_0) \left(1 - \frac{x-l_p'}{l_p-l_p'}\right) \quad (3)$$

4) полиномом третьей степени:

$$D(x) = D_0 - A \left(1 - \frac{x-l_p'}{l_p-l_p'}\right) - \left[(3(D_0 - d) - (2A + B)) \left(1 - \frac{x-l_p'}{l_p-l_p'}\right)^2 \right] + \left[(2(D_0 - d) - (A + B)) \left(1 - \frac{x-l_p'}{l_p-l_p'}\right)^3 \right] \quad (4)$$

где A, B -коэффициенты полинома третьей степени

Из всех представленных законов изменения профиля $D(x)$ самыми оптимальными являются экспоненциальный и полином третьей степени. Экспоненциальный оптимально применять при длинах резистивного слоя больше 10 мм для коаксиального сечения 7/3,04 мм. Для цилиндрического резистора С6-3 у которого длина резистивного слоя равна 8,4 мм лучше подходит профиль, соответствующий полиному третьей степени.

Проведя моделирование в диапазоне длин резистивного слоя $l_p=5..13$ мм были получены следующие оптимальные значения коэффициентов полинома третьей степени при значении диэлектрической проницаемости подложки резистора $\epsilon=6,8$ и компенсационным зазором $l'_p = 0,5$ мм.

l_p	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	7,098	4,557	3,584	3,239	3,144	3,133	3,132	3,15	3,151
B	8,27	4,54	2,95	2,2	1,82	1,61	1,47	1,39	1,325

Аппроксимируя расчетные точки коэффициентов полинома третьей степени с помощью линейной регрессией, следующего вида:

$$A(l_p) = a_1 + a_2 l_p^{-2} + a_3 l_p^{-4}$$

Можно получить следующие уравнения зависимости коэффициентов от длины резистивного слоя:

$$\begin{aligned} A(l_p) &= 3,475 + 80,075 l_p^{-2} + 4298 l_p^{-4} \\ B(l_p) &= 1,216 + 8,05 l_p^{-2} + 4622 l_p^{-4} \end{aligned}$$

Подставляя найденные уравнения в полином третьей степени, получим оптимальное уравнение профиля для коаксиального сечения 7/3,04 мм:

$$D(x) = D_0 - \left(3,475 + \frac{80,075}{(l_p - l'_p)^2} + \frac{4298}{(l_p - l'_p)^4} \right) \left(1 - \frac{x - l'_p}{l_p - l'_p} \right) - \left[\left(3(D_0 - d) - \left(8,166 - \frac{168,2}{(l_p - l'_p)^2} + \frac{13218}{(l_p - l'_p)^4} \right) \right) \left(1 - \frac{x - l'_p}{l_p - l'_p} \right)^2 \right] + \left[\left(2(D_0 - d) - \left(4,691 - \frac{88,125}{(l_p - l'_p)^2} + \frac{8920}{(l_p - l'_p)^4} \right) \right) \left(1 - \frac{x - l'_p}{l_p - l'_p} \right)^3 \right] \quad (5)$$

Полученные частотные зависимости коэффициента отражения от длины резистивного слоя для разных профилей согласования с оптимальными компенсационными зазорами представлены на рис. 2.

Аналогичным методом можно получить оптимальное уравнение профиля на основе полинома третьей степени для других коаксиальных сечений.

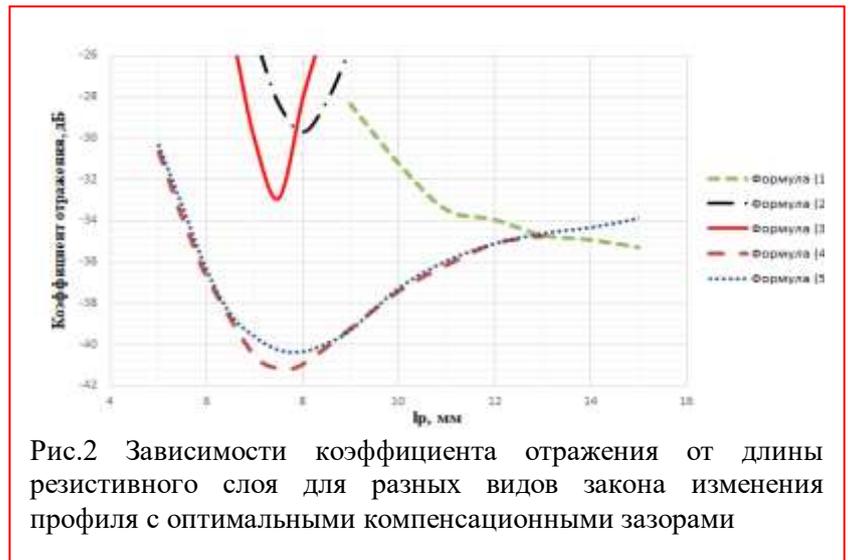


Рис.2 Зависимости коэффициента отражения от длины резистивного слоя для разных видов закона изменения профиля с оптимальными компенсационными зазорами

Литература

- [1] Tag A., Leinhos J. Design, simulation, and fabrication of broadband coaxial matched loads for the frequency range from 0 to 110 GHz // International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Volume 6, Issue 3-4: European Microwave Week 2013, June 2014, pp. 297 – 304.
- [2] Сверхширокополосные микроволновые устройства / А. М. Богданов [и др.]; ред.: А.П. Креницкий, В. П. Мещанов. - М.: Радио и связь, 2001. - 560 с.

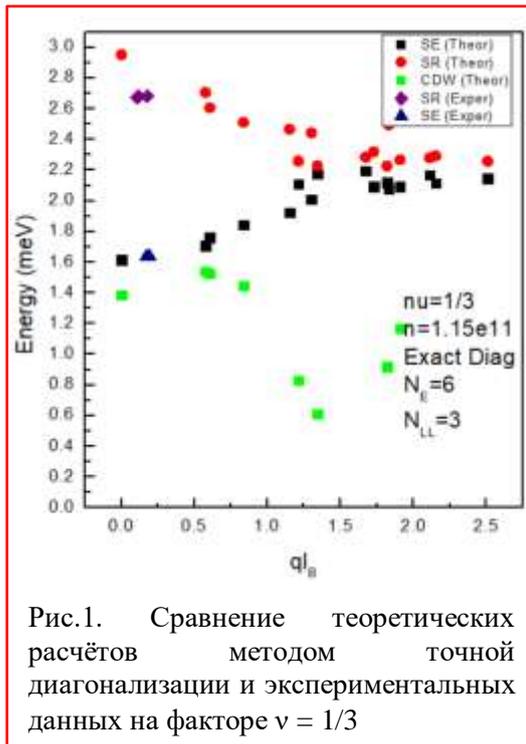
Спиновая жесткость двумерной электронной системы в ультраквантовом пределе

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

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

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

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



Устройство основного состояния в сильно коррелированных двумерных электронных системах в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) до сих пор является предметом для пристального изучения. В ультраквантовом пределе $\nu < 1$ даже при слабом взаимодействии $g_s \ll 1$ неизвестно как устроена волновая функция системы за исключением состояний дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ). Для случая сильного взаимодействия даже дробные состояния модифицируются из-за так называемого смешивания уровней Ландау.

В данной работе мы представим экспериментальное исследование спиновой обменной энергии и поляризации в диапазоне факторов заполнения $1 > \nu > 1/3$ произведённое на высококачественном образце ZnO с гетеропереходом. Величина обменной энергии является важнейшей характеристикой системы,

так как указывает насколько сильно электроны чувствуют друг друга. С помощью техники неупругого рассеяния света из спектров спиновых возбуждений извлекается обменный энергетический вклад в духе предыдущей работы [1]. Экспериментальные результаты сравниваются с расчётами в технике точной диагонализации для небольшого количества электронов (рис 1). Также дополнительно были проведены эксперименты по измерению люминесценции системы в разных поляризациях что позволило качественно узнать степень поляризации системы.

Литература

[1] A. B. Van'kov and I. V. Kukushkin, Spin stiffness of a Fermi liquid in the $\nu = 1$ quantum Hall regime, *Physical Review B* (2020).

Люминесценция монослоев MoSe_2 : влияние температуры и накачки**В.Е.Бисти,* А.С.Бричкин, Г.М.Голышков, А.В.Черненко**

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

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

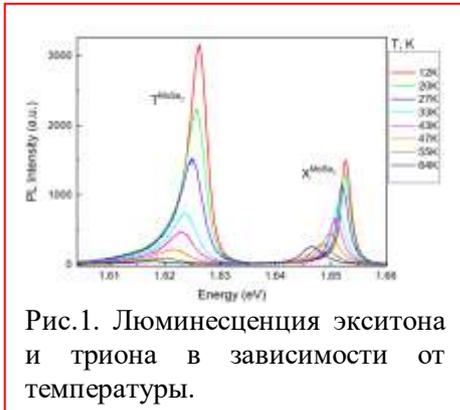


Рис.1. Люминесценция экситона и триона в зависимости от температуры.

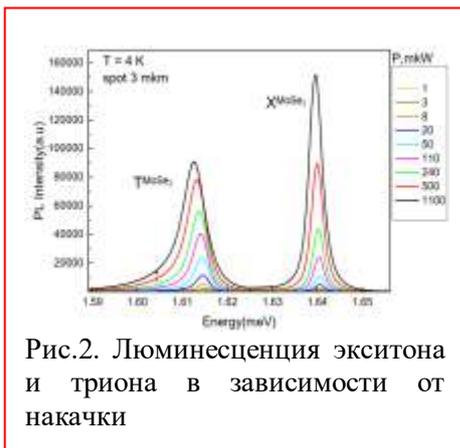


Рис.2. Люминесценция экситона и триона в зависимости от накачки

Для структур $\text{hBN-MoSe}_2\text{-hBN}$ изучалась люминесценция экситонов и трионов при нерезонансном фотовозбуждении электронно-дырочных пар в монослое MoSe_2 в температурном диапазоне $T \sim 10\text{-}70\text{K}$ при постоянной накачке и при $T=4\text{K}$ в зависимости от интенсивности накачки в широких пределах. Вследствие туннелирования электронов с донорных примесей из окружающих слоев hBN [1] в слое MoSe_2 имеются двумерные электроны. При стационарном возбуждении в системе в динамическом равновесии существуют экситоны, трионы и электронный ферми-газ. С ростом температуры линии люминесценции сдвигаются в сторону меньших энергий, сдвиг сильнее для линии триона. Интенсивность люминесценции падает, причем для триона быстрее, чем для экситона. При низких температурах преобладает трион, при высоких – экситон (Рис.1). При значительном увеличении накачки интенсивность люминесценции растет, при меньших накачках преобладает трион, при больших – экситон. Также с ростом накачки наблюдается сдвиг в сторону меньших энергий, более сильный для триона (Рис.2). Люминесценция слоев MoSe_2 , инкапсулированных hBN , определяется концентрациями экситонов, трионов и электронов и их

распределением по энергиям, в общем случае неравновесным. Общий для экситона и триона сдвиг можно объяснить изменением ширины запрещенной зоны монослоя MoSe_2 с температурой (при накачке - незначительный сдвиг за счет разогрева). Изменение расстояния между линиями экситона и триона при низких температурах пропорционально энергии Ферми электронов [2], что может говорить о росте концентрации свободных электронов. С ростом температуры увеличивается влияние распределения частиц по энергиям. Также возможен зависящий от температуры вклад в люминесценцию с участием локализованных состояний. Падение интенсивности с ростом температуры можно объяснить ростом безызлучательной рекомбинации. С ростом накачки интенсивность линии экситонов растет быстрее, поскольку число трионов ограничено числом электронов.

Литература

- [1] Roland Gillen, John Robertson, Janina Maultzsch, Phys. Status Solidi B 251, 2620 (2014).
 [2] M. M. Glazov, J. Chem. Phys. 153, 034703 (2020).

Магнетизм пленок InMnSb

А.И.Дмитриев,^{1*} Л.С.Паршина,² М.С.Дмитриева,¹ О.Д.Храмова,² О.А.Новодворский²

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

²ИПЛИТ РАН, филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 140700, Шатура, ул. Святоозерская, д.1

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

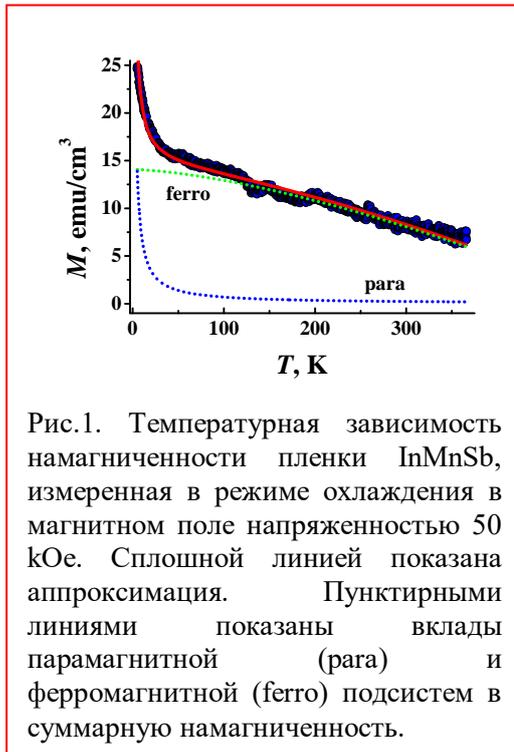


Рис.1. Температурная зависимость намагниченности пленки InMnSb, измеренная в режиме охлаждения в магнитном поле напряженностью 50 кОе. Сплошной линией показана аппроксимация. Пунктирными линиями показаны вклады парамагнитной (para) и ферромагнитной (ferro) подсистем в суммарную намагниченность.

Исследованы магнитные свойства пленок InMnSb. В различных магнитных полях измерены температурные зависимости магнитного момента пленок $M(T)$, охлажденных в нулевом магнитном поле (ZFC) и магнитном поле напряженностью 50 кОе (FC), а также петли магнитного гистерезиса $M(H)$. Анализ полученных магнитных данных показал, что пленки состоят из двух магнитных подсистем: ферромагнитная подсистема нановключений MnSb и парамагнитная подсистема диспергированных ионов Mn^{2+} в матрице InSb. Аппроксимация зависимости $M(T)$ парамагнитной фракции функцией Кюри-Вейса (рис.1) позволила оценить концентрацию диспергированных примесных ионов Mn^{2+} $n_i = (6.8 \pm 0.5) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, которая заметно превосходит предел растворимости примеси марганца в массивных кристаллах InSb. В результате анализа кривой $M(T)$ ферромагнитной фазы нановключений MnSb в

рамках закон Блоха 3/2 (рис.1) определены намагниченность насыщения $M_s = 225 \pm 24 \text{ emu/cm}^3$ ($1.1 \pm 0.1 \text{ } \mu\text{B/ион}$) и температура Кюри $T_C = 529 \pm 6 \text{ K}$ нановключений MnSb. Значения обеих величин оказались заметно ниже, чем в массивных монокристаллических образцах. Зависимости $M(H)$ нановключений MnSb аппроксимировались функцией Ланжевена, что позволило оценить число нановключений MnSb в единице объема пленки InMnSb $n = (1.7 \pm 1.4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и их среднюю намагниченность $m = (1.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-16} \text{ emu}$ (в среднем 12000 μB на одно нановключение). Величина коэрцитивной силы нановключений MnSb, равная 375 Ое, оказалась близка к соответствующему значению как для пленок MnSb, так и для наночастиц MnSb, полученных ранее различными методами. Анализ FC – ZFC зависимостей, измеренных в различных полях, позволил установить зависимость температуры блокировки T_b нановключений MnSb от напряженности внешнего магнитного поля H . Аппроксимация зависимости $T_b(H)$ позволила оценить значения поля $H_a = 812 \pm 265 \text{ Oe}$ и константы магнитной анизотропии $K = (1.1 \pm 0.3) \cdot 10^5 \text{ erg/cm}^3$, которые оказались близки к соответствующей величине определенной ранее для монокристаллов Mn_xSb_{1-x} нестехиометрического состава $x = 52.8 \%$.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег. номер 124013100858-3) и ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Температура магнитного упорядочения в $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ и влияние на нее вакуумной термообработки

М.С.Дмитриева,^{1*} А.И.Дмитриев,¹ В.Д.Седых²

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

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

*e-mail: maiyasnig@yandex.ru

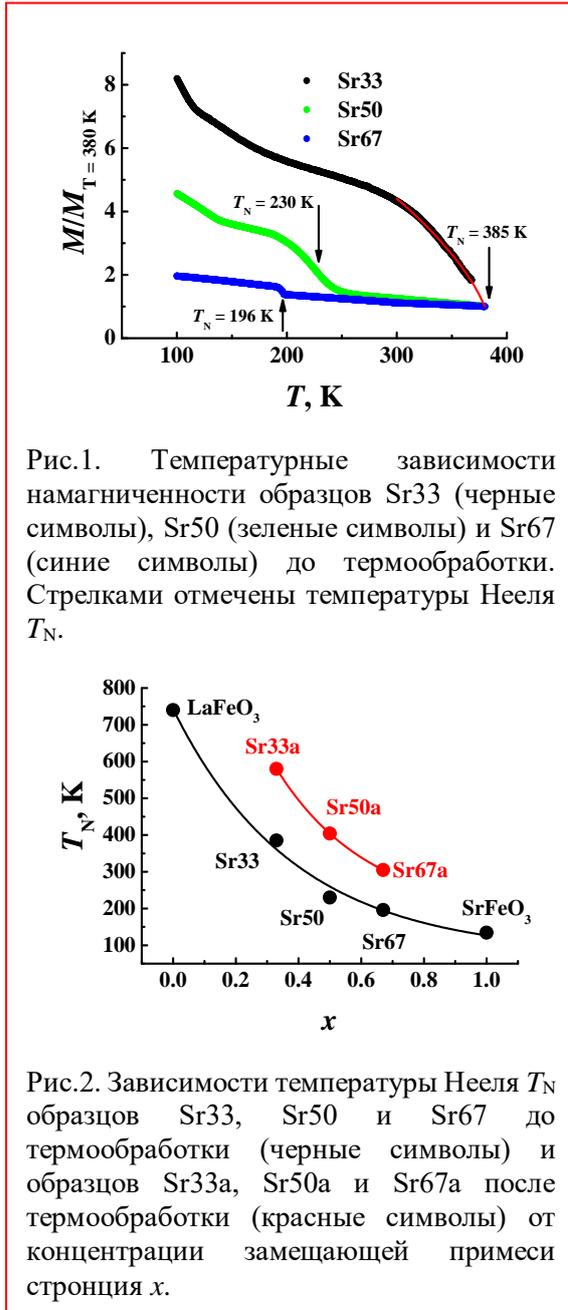


Рис.1. Температурные зависимости намагниченности образцов Sr33 (черные символы), Sr50 (зеленые символы) и Sr67 (синие символы) до термообработки. Стрелками отмечены температуры Нееля T_N .

Рис.2. Зависимости температуры Нееля T_N образцов Sr33, Sr50 и Sr67 до термообработки (черные символы) и образцов Sr33a, Sr50a и Sr67a после термообработки (красные символы) от концентрации замещающей примеси стронция x .

Детально изучены зависимости магнитного момента от температуры поликристаллических образцов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ ($x = 0.33, 0.50, 0.67$) до (обозначены как Sr33, Sr50 и Sr67) и после (обозначены как Sr33a, Sr50a и Sr67a) вакуумной термообработки [1]. Для каждого из образцов определена температура Нееля, при которой в них формируется магнитоупорядоченное состояние типа скошенного антиферромагнетика (слабого неколлинеарного ферромагнетика) (рис.1).

Обнаружено, что введение замещающей примеси стронция в $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{FeO}_{3-\delta}$ и увеличение ее концентрации приводит к существенному понижению температуры магнитного упорядочения (рис.2).

Показано, что этот эффект может быть компенсирован вакуумной термообработкой, при которой наблюдается заметное возрастание температуры Нееля.

Наблюдаемые эффекты вариации температуры Нееля объясняются изменением валентного состояния ионов железа и углов Fe–O–Fe при замещении или термообработке.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег. номер 124013100858-3) и ИФТТ им. Ю.А. Осипьяна РАН.

Литература

[1] А.И. Дмитриев, С.В. Зайцев, М.С. Дмитриева, О.Г. Рыбченко, В.Д. Седых, ФТТ 66, 386 (2024).

Исследование влияния метода активации на эффективность ГКР-подложки на основе тонкой многокомпонентной пленки Ag-Nb-N-O

Ю.В.Чумаченко,¹ Д.В.Новиков,¹ И.Ю.Белоконева,¹ С.В.Дубков,¹ Д.Г.Громов,¹
В.Д.Громов,¹ Е.А.Лебедев,¹ Л.С.Волкова,^{1,2} Т.С.Гришин^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498 Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д.1

²Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, 119334 Москва, Ленинский проспект, д.32А

*e-mail: sv.dubkov@gmail.com

Сенсоры гигантского комбинационного рассеяния (ГКР-сенсоры) света являются перспективным инструментом высокочувствительного и быстрого анализа для медицинских, биологических, химических и экологических исследований. Ключевым элементом ГКР-сенсоров является массив наночастиц на поверхности подложки, от условий формирования которого будут зависеть характеристики устройства. В большинстве случаев массив наночастиц формируется в процессе изготовления сенсора химическими, физическими или литографическими методами и в дальнейшем не предполагает изменений, тем самым ограничивая возможности не только подстройки под конкретное анализируемое вещество, но и эксплуатации, что связано с окислением наночастиц и адсорбцией летучих веществ поверхностью сенсора при контакте с открытой атмосферой.

Перспективным решением данных проблем является применение тонкой многокомпонентной плёнки, которая при активации посредством энергетического воздействия способна формировать на своей поверхности массив наночастиц. Таким образом потенциально решаются все описанные проблемы: до момента активации материал наночастиц не подвергается окислению; при энергетическом воздействии, провоцирующем нагрев тонкой плёнки, происходит удаление адсорбированных веществ; посредством выбора условий энергетического воздействия можно управлять геометрическими параметрами формируемых наночастиц.

В данной работе было исследовано влияние различных режимов активации на ГКР-сенсоры на основе тонкой многокомпонентной плёнки Ag-Nb-N-O. Был изучен процесс СВЧ-активации ГКР-подложки от времени при постоянной мощности. Был исследован процесс электрической активации ГКР-подложки в гальваностатическом режиме при разных заданных значениях тока. Был исследован процесс термической активации ГКР-подложки посредством вакуум-термического отжига при различных температурах. Изменения морфологии поверхности тонкой плёнки и формирующегося массива производилось методом растровой электронной микроскопии. Спектроскопические исследования проводились с помощью Рамановского микроскопа Confotec MR200. Анализируемым веществом выступали растворы малахитового зелёного оксалата различных концентраций. Был установлен предел детектирования и коэффициент усиления структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-19-00610.

Плазменный отклик металлической “решётчатой” метаповерхности на подложке

М.С.Соколова,^{1,2} К.Р.Джикирба,^{1*} А.С.Астраханцева,^{1,2} И.В.Кукушкин,¹
В.М.Муравьев¹

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

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

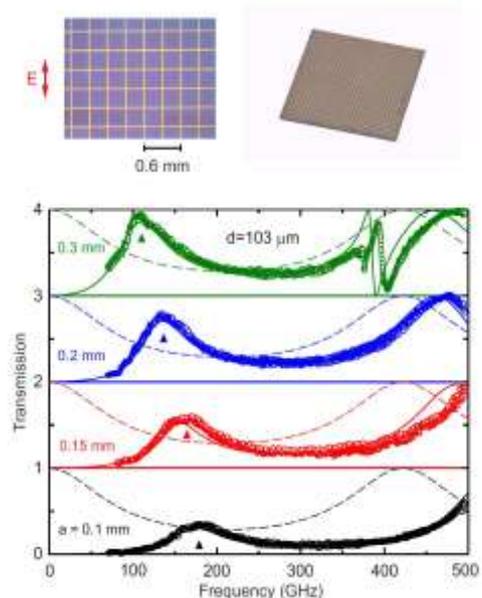
*e-mail: dzhikirba.kr@phystech.edu

Плазменные возбуждения в двумерных системах изучаются более пятидесяти лет. Эти исследования привели к открытию множества новых фундаментальных физических результатов. Для современных полупроводниковых и слоистых материалов наблюдение двумерных плазмонов в частотном диапазоне до 500 ГГц ограничено областью криогенных температур. В настоящей работе мы демонстрируем, что двумерная металлическая решётка на кремниевой подложке при комнатной температуре выступает в качестве метаповерхности, пропускание и отражение которой имеет отклик аналогичный отклику эффективной ДЭС, связанному с возбуждением в ней поперечной электромагнитной плазменной моды.

Образцы представляли собой плоскопараллельные пластины, изготовленные из кремния с сопротивлением на квадрат более 30 кОм×см. На одной стороне чипа была напылена квадратная металлическая сетка с периодом a и шириной полосы w . Измерения спектров пропускания проводились на установке терагерцовой спектроскопии “Эпсилон”. В качестве источника непрерывного терагерцового излучения использовались лампы обратной волны (ЛОВ) с диапазоном частот 50–500 ГГц. Мощность излучения, прошедшего через образец, регистрировалась пирозлектрическим детектором. Для подавления шумов падающее на образец электромагнитное излучение модулировалось оптико-механическим модулятором с частотой 23 Гц.

На рисунке разным цветом показаны спектры пропускания, измеренные для четырёх образцов с периодами сеток от 100 мкм до 300 мкм, с резонансами, отмеченными стрелками. По форме эти спектры очень похожи на спектры пропускания для реальных двумерных электронных систем. Мы провели численное моделирование пропускания, представленное на графике сплошными линиями. Видно, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с численным расчетом, выполненном в пакете компьютерного моделирования HFSS. Таким образом,

металлическая сетка на диэлектрической подложке имеет электромагнитный отклик, похожий на отклик реальной ДЭС. Качественно это можно объяснить тем, что металлические полосы, направленные вдоль поляризации падающего излучения, имитируют кинетическую индуктивность двумерной электронной системы. А полосы, перпендикулярные падающей поляризации, не оказывают заметного влияния на спектр пропускания.



Спектры отражения двумерных экситонов в гетероструктурах с монослоями MoSe_2 и WSe_2

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

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

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

Гетероструктуры с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) являются перспективными объектами для фундаментальных исследований и практических применений благодаря особенностям зонной структуры мономолекулярных слоев, которые имеют ширину запрещенной зоны, способствующую сильному поглощению света в видимом спектральном диапазоне. Общепринятым решением для подобных структур

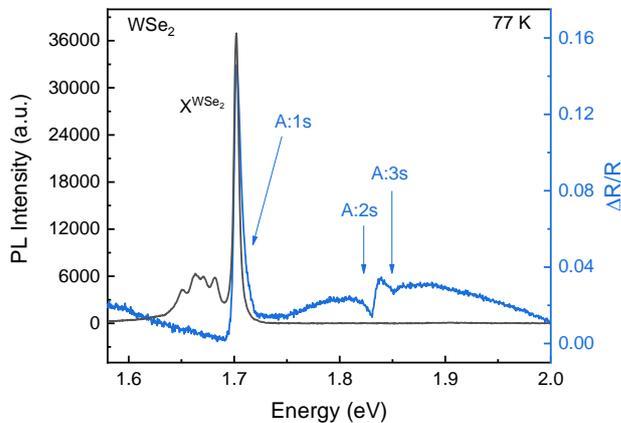


Рис. 1. Спектры отражения и микрофотолуминесценции для структуры с монослоем WSe_2 на подложке SiO_2/Si при 77 К.

является инкапсулирование монослоев ДПМ гексагональным нитридом бора (hBN), поскольку это позволяет получить гетероструктуры, устойчивые к окружающей среде и многократному термоциклированию. Малая эффективная диэлектрическая проницаемость и большая эффективная масса приводят к энергии связи экситона в несколько сотен мэВ, что позволяет наблюдать экситонные эффекты при температурах вплоть до комнатной. Учет двумерного потенциала электронно-дырочного взаимодействия, а также особенностей диэлектрического экранирования [1] модифицируют ридберговскую серию экситонных состояний, поэтому важной задачей становится определение энергии связи экситонов и параметров зонной структуры для гетероструктур с монослоями ДПМ. Узкие линии в спектрах отражения (рис. 1) позволяют идентифицировать переходы с участием возбужденных состояний, а также экситонов отщепленной зоны. Однако стоит учитывать, что форма спектра отражения от слоистой Ван-дер-Ваальсовой структуры формируется не только за счет монослоя ДПМ, но и за счет слоев hBN и подложки. Анализ дифференциальных коэффициентов отражения осуществлялся посредством численного моделирования с использованием формализма метода матриц переноса [2], что позволило добиться хорошего совпадения с экспериментальными данными. Оценка энергии связи экситонов проводилась посредством численного решения уравнения Шредингера для экситона с использованием потенциала электронно-дырочного взаимодействия [2].

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1]. G. Wang, A. Chernikov, M. Glazov et al., Colloquium: Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides. *Rev. Mod. Phys.* 90, 021001 (2018).
- [2]. С. Robert, M.A. Semina et al., Optical spectroscopy of excited exciton states in MoS_2 monolayers in van der Waals heterostructures. *Phys. Rev. Mater.* 2, 0110 (2018).

Исследование спин-орбитального взаимодействия в гетеропереходах ZnO/MgZnO посредством спектроскопии спинового резонанса

А.Р.Хисамеева,* А.В.Щепетильников, А.А.Дремин, И.В.Кукушкин

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

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

Взаимодействие между спиновой степенью свободы и орбитальным движением электрона играет ключевую роль в современной спиновой физике конденсированного состояния. Действительно, оно лежит в основе целого ряда нетривиальных фундаментальных явлений, таких как спиновый и аномальный эффекты Холла, топологические изоляторы, фермионы Майорана. С прикладной точки зрения, взаимодействие такого типа определяет релаксацию неравновесной спиновой поляризации и может быть использовано для управления спиновыми состояниями носителя заряда. Таким образом, изучение спин-орбитального взаимодействия в различных материальных системах является крайне важной научной задачей, на решение которой направлено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований.

В настоящей работе было проведено подробное исследование спин-орбитального взаимодействия в серии содержащих двумерную электронную систему гетеропереходов ZnO/MgZnO со структурой вюрцита [1]. Константы спин-орбитального взаимодействия определялись из анализа обусловленной спин-орбитальным взаимодействием модификации одночастичного g -фактора в режиме квантового эффекта Холла. Данный подход был успешно применен нами ранее для квантовых ям AlAs [2] и гетеропереходов GaN/AlGaIn [3]. Величина g -фактора при этом с высокой точностью измерялась посредством методики электронного спинового резонанса в широких диапазонах магнитных полей и частот электромагнитного излучения. Константы спин-орбитального взаимодействия были определены для серии образцов с различной концентрацией Mg, что позволило получить зависимость константы спин-орбитального взаимодействия от двумерной плотности электронов n . Измеренная величина константы лежала в диапазоне 0.5 - 0.8 мэВхÅ и достаточно слабо зависела от концентрации n . Аппроксимация экспериментальных данных позволила определить коэффициенты $\alpha_0 = 0.5$ мэВхÅ и $\gamma = 0.12$ мэВхÅ³, задающие линейный и кубический по волновому вектору вклады в спин-орбитальное взаимодействие, соответственно. Эти значения были соотнесены с результатами, полученными другими научными группами.

Литература

- [1] А. Р. Хисамеева, А. В. Щепетильников, А. А. Дремин, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ том 117 вып. 19, с. 689-694 (2023).
- [2] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, Yu. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, L. Tiemann, C. Reichl, W. Dietsche, and W. Wegscheider, Phys. E (Amsterdam, Neth.) 124, 114278 (2020).
- [3] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, V. V. Solovyev, A. Großer, T. Mikolajick, S. Schmilt, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. Appl. 18, 024037 (2022).

Соотношение интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент спектра рамановского рассеяния света с гигантским поверхностным усилением при мощном импульсном лазерном возбуждении

В.Е.Кирпичев,* Т.Д.Рудаков, А.С.Астраханцева, В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин

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

**kirpichevve@gmail.com*

Гигантское усиление амплитуды электромагнитного поля в эффекте поверхностно-усиленного рамановского рассеяния света (SERS-эффект) приводит к необходимости рассматривать в этом случае влияние нелинейных эффектов. Действительно, амплитуда электрического поля в атоме составляет порядка 5×10^9 В/см, а амплитуда внешнего электромагнитного поля, при котором следует ожидать разрушение молекул при мощном фотовозбуждении, имеет масштаб $\sim 10^7$ В/см. Интересно сравнить эту оценку с амплитудой электрического поля в электромагнитной волне с плотностью мощности, которая используется в типичных экспериментах по рамановскому рассеянию света. При мощности лазерного излучения 0.1 Вт, сфокусированного в пятно диаметром 10 микрон, получается, что амплитуда поля в волне оказывается порядка 2×10^4 В/см. Таким образом, поскольку в условиях SERS-эффекта может наблюдаться усиление амплитуды электрического поля на 2-3 порядка, то уже при типичных накачках можно ожидать, что нелинейные эффекты будут доминировать. Одним из возможных проявлений нелинейных эффектов в рамановском рассеянии с гигантским усилением является наблюдение вынужденного (стимулированного) рассеяния света.

В настоящей работе мы использовали импульсное лазерное возбуждение, при котором амплитуда мощности значительно превышала уровень возбуждения, использованный нами ранее [1]. Это позволило нам пройти в область больших накачек и достигнуть режима, при котором интенсивности стоксовых и антистоксовых линий рассеяния сравниваются друг с другом. При этом короткий импульс обеспечивал отсутствие значительного перегрева, в результате чего обеспечивалась неизменность и воспроизводимость рамановского сигнала в течение всего эксперимента. Обнаружено, что интенсивность антистоксового канала рассеяния растет сверхлинейно с мощностью возбуждения, а, начиная с некоторого уровня фотовозбуждения, интенсивность растет пороговым образом. При этом интенсивность стоксового рассеяния демонстрирует линейное и затем сублинейное (при больших накачках) поведение от мощности лазерного возбуждения. Показано, что значение пороговой мощности зависит от коэффициента SERS-усиления. Установлено, что порог стимулированного антистоксового рассеяния достигается лишь при значениях SERS-усиления, превышающих 10^7 . Показано, что при превышении пороговой мощности перестает выполняться соотношение между интенсивностями антистоксовых и стоксовых линий, которое экспоненциально зависит от рамановского сдвига. В то же время, в структурах со значениями коэффициента усиления меньшими, чем 10^6 , при повышении мощности наблюдается простой разогрев системы, при котором соотношение интенсивностей линий в стоксовой и антистоксовой компонентах отвечает хорошо известной экспоненциальной зависимости.

Литература

[1] В.И. Кукушкин, В.Е. Кирпичев, Е.Н. Морозова, А.С. Астраханцева, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 116, 211-216 (2022).

Изучение транспортных свойств потенциального топологического изолятора SrSn_2As_2

А.А.Лычагина,¹ В.А. Власенко²

¹*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Долгопрудный, Институтский переулок, д.9*

²*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53*

SrSn_2As_2 является гексагональным слоистым материалом, состоящим из слоев Sn-As-Sr-Sn-As, связанных силой Ван-дер-Ваальса и образующих точечную группу типа $R\bar{3}m$. Согласно теоретическим предсказаниям, данный материал может быть топологическим изолятором. [1] Полученные экспериментальные данные в работе [2] на ARPES совместно с расчётом зонной структуры позволили авторам сделать вывод, что SrSn_2As_2 может быть материалом с топологическими свойствами. Учитывая, что в данном структурном семействе существуют как сверхпроводящие соединения (NaSn_2As_2), так и магнитное (EuSn_2As_2) можно предположить, что данное семейство представляет собой удобную площадку для исследования топологической сверхпроводимости с майорановскими связанными состояниями.

Измерения транспортных электронных свойств проводились на установке PPMS-9. Использовалась стандартная четырехконтактная схема измерения, позволяющая исключить из результатов сопротивление самих контактов и контактную разность потенциалов. Для работы отбирались монокристаллы с минимальными дефектами поверхности (т.е. без царапин и сколов). Далее образцы фиксировались на столике с 4 контактными площадками. Соединение контактов с образцом осуществлялось при помощи тонкой золотой проволоки и серебряной пасты.

На температурной зависимости сопротивления монокристалла SrSn_2As_2 наблюдается полупроводниковый ход кривой при высокой температуре порядка 190 К, что можно интерпретировать как постепенное уменьшение числа объемных носителей. При температуре ниже 190 К характер температурной зависимости указывает на признаки металлической проводимости, далее сопротивление монокристалла остается почти постоянным для температуры ниже 10 К. Аналогичное поведение при низких температурах наблюдалось и во многих других тонких пленках и наноструктурах топологических изоляторов. [3] В то же время сопротивление значительно меньше, чем в Bi_2Se_3 , что свидетельствует в пользу не топологической природы данного материала.

Литература

- [1] *Q. Gibson*. [et al.]. Three-dimensional Dirac semimetals: Design principles and predictions of new materials // *Phys. Rev. B*, 91(2015), 205128.
 [2] *Rong, LY*. [et al.]. Electronic structure of SrSn_2As_2 near the topological critical point // *Sci Rep* 7, 6133 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05386-x>
 [3] *Tang J*. [et al.]. Electrical detection of spin-polarized surface states conduction in ($\text{Bi}_0.53\text{Sb}_0.47$) 2Te_3 topological insulator // *Nano letters*. 2014. V.14(9). P. 5423-5429.

Исследование возможности применения островковых SERS-структур на основе GaP для инфракрасного частотного диапазона

С.М.Макаровская,* В.В.Соловьев, Т.Д.Рудаков, И.В.Кукушкин

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

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

Актуальной проблемой рамановской спектроскопии является создание SERS-структур, имеющих высокий коэффициент усиления в ИК-области частот. Данный диапазон, в отличие от видимого, характеризуется отсутствием флуоресценции, уменьшением деградации молекул ввиду поглощения света и увеличением добротности плазменных волн. Однако чувствительность детекторов в инфракрасном частотном диапазоне ниже, чем для видимого, следовательно, необходимо усиливать рамановский сигнал для получения возможности детектировать малые концентрации исследуемых веществ.

Наноостровковые SERS-структуры на подложках из SiO₂ не способны усиливать в ИК-области спектра, в то время как структуры на GaP позволяют получить спектр при длине волны лазерного возбуждения 1064 нм за счет большего показателя преломления для данной длины волны. Эта характеристика материала обуславливает степень сжатия локального электрического поля, что влияет на интенсивность сигнала, следовательно, позволяет на порядки повысить чувствительность в необходимом нам диапазоне.

Для изготовления наноостровковых структур не требуется трудоемкий процесс литографии и травления, в отличие от существующих комбинированных металл-диэлектрических метаструктур для ИК-диапазона.

В данной работе было проведено сравнение интенсивностей рамановского сигнала для SERS-подложек из SiO₂ и GaP для длин волн лазерного возбуждения 532 нм, 638 нм, 785 нм и 1064 нм, а также получена зависимость коэффициента усиления рамановского сигнала от толщины напыленного слоя Ag.

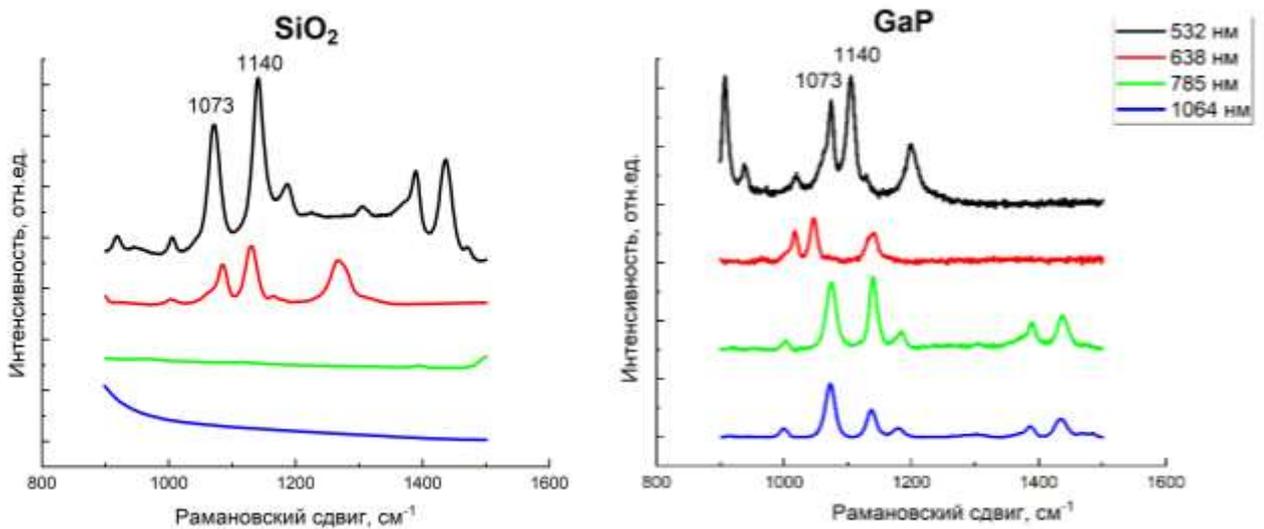


Рис.1. Рамановские спектры вещества 4-АВТ, полученные на наноостровковых структурах на SiO₂ и GaP. Длины волн лазерного возбуждения: 532, 638, 785 и 1064 нм

Зависимость коэффициента усиления SERS-структур с большим периодом модуляции от высоты диэлектрических столбиков

А.С.Астраханцева, С.М.Макаровская,* В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин

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

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

Методы оптической спектроскопии играют все большую роль в медицине и в биофизике, и при этом на первый план выходят задачи идентификации органических молекул и микроорганизмов при очень низких концентрациях. Рамановская спектроскопия, которая позволяет однозначно распознавать органические молекулы по спектрам неупругого рассеяния света благодаря возбуждению большого количества разных специфических колебательных и вращательных мод, как нельзя лучше подходит для этих целей. Явление гигантского усиления рамановского рассеяния (SERS), обнаруженное на наноструктурированных металлических подложках, обеспечивает увеличение сигнала неупругого рассеяния света в миллионы раз, что делает возможным применение рамановских методов на практике, например, в медицине. Высокая чувствительность SERS-методов достигается за счет усиления электромагнитного поля вблизи поверхности наноструктурированных металлических подложек благодаря резонансному возбуждению коллективных поверхностных плазмон-поляритонных мод. Нами были разработаны SERS-подложки нового типа, основанные на комбинации диэлектрических и металлических резонаторов, в которых коэффициент SERS-усиления достигает рекордных значений 10^9 . Эти подложки имеют периодическую структуру, и наибольший коэффициент SERS-усиления достигался при субмикронных периодах. Однако при таких малых периодах было необходимо использовать методы электронной литографии, что существенно увеличивало стоимость таких SERS-структур. Одна из важнейших задач бионанотехнологии заключается в разработке дешевых SERS-структур, работающих с максимальным усилением как в видимом диапазоне длин волн, так и в ближней ИК-области. Это означает, что при изготовлении SERS-структур необходимо использовать фотолитографию, и при этом характерный период структур увеличится до 2 микрон. В настоящей работе мы исследовали зависимости коэффициента SERS-усиления от высоты диэлектрических столбиков при фиксированном периоде структуры $P = 2170$ нм. Установлено, что для длин волн лазера 532 нм, 638 нм, 785 нм и 1064 нм коэффициент SERS-усиления растет с увеличением высоты столбиков вплоть до высот 1200 нм и достигает значений более 10^7 , что делает такие структуры весьма привлекательными для практического использования.

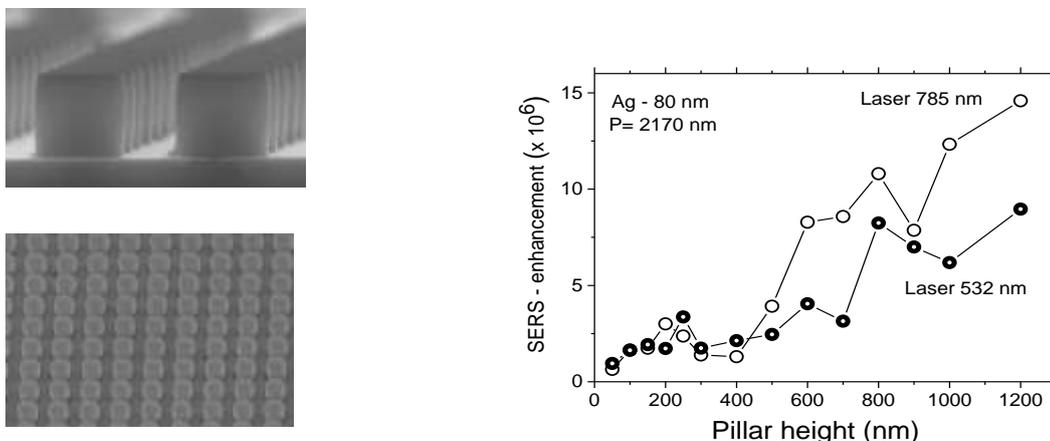


Рис.1. Фотографии SERS-структур с периодом 2170 нм, изготовленных методом фотолитографии, и зависимости коэффициента SERS-усиления от высоты диэлектрических столбиков, измеренные для двух длин волн лазера: 532 нм и 785 нм.

Экспериментальные исследования порогов генерации циркулярно поляризованного излучения инжекционных полупроводниковых лазеров

А.А.Максимов*, И.И.Тартаковский

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

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

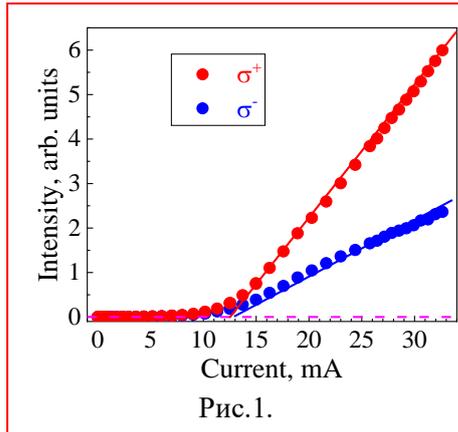


Рис.1.

Оптические микрорезонаторы на основе обычных ахиральных $A^{III}B^V$ полупроводниковых материалов $AlAs/(Al,Ga)As/GaAs$ с хиральным фотонным кристаллом, вытравленным на верхнем брэгговском зеркале, позволяют получить в этих системах полный контроль над поляризацией излучения электромагнитных мод. В работе [1] было показано, что инжекционный поверхностно-излучающий микролазер с таким вертикальным резонатором в режиме развитой многомодовой генерации может демонстрировать в некоторых модах высокую степень циркулярной поляризации ρ_C вплоть до значений $\sim 90\%$.

Были подробно изучены основные оптические характеристики таких компактных источников когерентного излучения [1], температурные зависимости лазерной генерации [2] и неравновесные процессы при различных температурах в электронной и фононной подсистемах лазерной структуры, возбужденной прямоугольными электрическими импульсами [3].

Типичные зависимости интенсивности излучения исследованных инжекционных лазеров в различных циркулярных поляризациях при изменении тока, текущего через структуру, показаны на рис. 1. Характерной особенностью лазеров, изученных в работах [1-3], была низкая степень циркулярной поляризации излучения ρ_C ($< 10\%$) в спонтанном режиме при малых токах, которая резко возрастала при увеличении тока выше порогового значения (рис. 2). В докладе подробно обсуждаются нелинейные оптические процессы, происходящие вблизи порогов генерации инжекционных лазеров с циркулярной поляризацией излучения, которые приводят к такой зависимости ρ_C от тока, текущего через лазерную структуру (рис. 2).

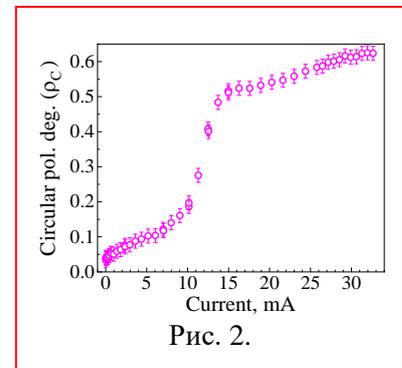


Рис. 2.

Литература

- [1] А.А. Максимов, Е.В. Филатов, И.И. Тартаковский *et al.*, Phys. Rev. Appl. **17**, L021001 (2022).
- [2] А.А. Максимов, Е.В. Филатов, И.И. Тартаковский, Письма в ЖЭТФ **116**, 500 (2022).
- [3] А.А. Максимов, Е.В. Филатов, В.В. Филатов *и др.*, Изв. РАН. Сер. физ. **87**, 182 (2023).

Исследование распространения радиоволн субтерагерцового диапазона в сверхразмерных металл-диэлектрических волноводах

С.Ю.Молчанов,* И.Ш.Бахтеев, В.М.Муравьев

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

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

Применение субтерагерцового излучения с каждым годом становится шире. Оно включает спектроскопию, системы визуализации и контроля безопасности, дистанционное зондирование и др.

Стандартные волноводы субтерагерцового диапазона отличаются от привычных волноведущих систем СВЧ только размерами. Так, для частоты 0,1 ТГц используется волновод сечением 2,4x1,2 мм. Потери в такой линии сильно зависят от качества изготовления, но в среднем составляют около 5 дБ на метр. С ростом частоты необходимо пропорционально уменьшать сечение стандартного прямоугольного волновода. Так. На частотах 0,2-0,25 ТГц используют канал 1,1x0,55 мм. Очевидно, что потери при передаче и сложность изготовления подобных систем, также увеличиваются. На частотах выше 0,3 ТГц становится крайне затруднительно использовать стандартные приемы производства компонентной базы на прямоугольных волноводах.

Создание и развитие новых волноводов субтерагерцового и терагерцового диапазонов позволило достигнуть уровня затухания меньше 1 дБ/м [1-2], что сопоставимо, или даже превосходит передачу энергии по воздуху. Примечательно, что среди конструкций с наименьшими потерями – полые круглые и квадратные металлические волноводы с диэлектрическим заполнением на стенках, начало исследований которых было положено ещё в 70-80-х годах прошлого века [3]. Их размер существенно превосходит стандартные волноводные сечения, поэтому они проще в изготовлении и могут быть использованы для построения компонентной базы для систем субтерагерцового диапазона.

На рис.1 представлены частотные зависимости распространения электромагнитной волны в сверхразмерных волноводах с сечениями 10x10 мм, 14x14 мм, 18x18 мм и 22x22 мм, внутренние стенки которых покрыты диэлектриком ($\epsilon=2,4$) толщиной 0,5 мм. С

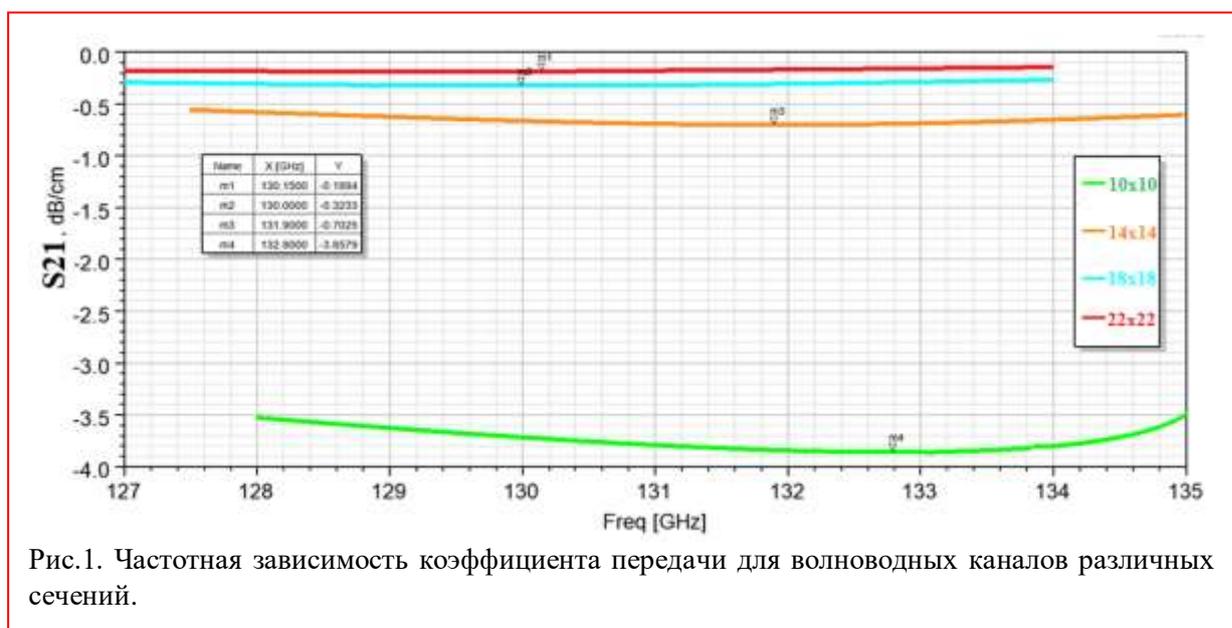


Рис.1. Частотная зависимость коэффициента передачи для волноводных каналов различных сечений.

увеличением размера канала потери уменьшаются. Также наблюдается уменьшение потерь

и с ростом частоты. Поэтому волноводный канал с сечением 10x10 мм будет целесообразно использовать при меньших длинах волн.

Литература

- [1] Mitrofanov O. et al. Reducing transmission losses in hollow THz waveguides //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Т. 1. – №. 1. – С. 124-132.
- [2] Безбородов В. И. и др. Квазиоптические радиоизмерительные устройства ближнего миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе металлодиэлектрического волновода квадратного сечения. – 2007.
- [3] Казанцев Ю. Н., Харлашкин О. А. Прямоугольные волноводы класса “полый диэлектрический канал” //Радиотехника и электроника. – 1978. – Т. 23. – №. 10. – С. 2060-2068.

Использование ГКР-активных мембран для single-cell анализа антибиотикорезистентности

В.А.Мушенков¹, В.И.Кукушкин,² А.Н.Нечаев,³ Е.Г.Завьялова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1

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

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

*e-mail: vladimir.mushenkov@mail.ru

В настоящее время одной из наиболее важных проблем современной медицины является антибиотикорезистентность, возникающая, когда бактерии путем генетических мутаций или горизонтального переноса генов приобретают устойчивость к антибактериальным препаратам. Интенсивное использование антибиотиков во многих сферах человеческой деятельности приводит к возрастающим темпам распространения антибиотикорезистентности и снижению эффективности антибактериальной терапии. Сложность излечения устойчивых инфекций обуславливается ещё и тем, что используемые методы определения чувствительности патогена к выбранной схеме лечения весьма долгие (типичное время анализа – несколько суток), поэтому антибактериальный препарат часто выбирается эмпирически.

Нами был разработан быстрый (время анализа 1-2 часа) метод определения антибиотикорезистентности, основанный на спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) формазана. Формазан выделяется при обработке бактерий тетразолиевым красителем МТТ, причем его концентрация коррелирует с жизнеспособностью бактерий, таким образом, устойчивые штаммы будут иметь гораздо более выраженный спектр формазана после обработки антибиотиком, чем чувствительные.

Чувствительность метода ($1 \cdot 10^7$ клеток / мл) достаточна для исследования выделенных чистых культур, однако слишком низкая для исследования клинических образцов напрямую. В данной работе мы предложили способ повышения чувствительности с использованием гигантского комбинационного рассеяния (ГКР). В качестве субстрата для ГКР были предложены наночастицы серебра и хрома, иммобилизованные на поверхности пористой полимерной мембраны. Наноразмерные поры мембраны пропускают воду и мелкие частицы, задерживая бактерии и кристаллы формазана. Нами были рассмотрены различные вариации мембран и наночастиц, а также различные длины волн лазера КР – спектрометра. За счет эффекта ГКР чувствительность удалось повысить до $1 \cdot 10^3$ клеток в миллилитре, что достаточно для большинства клинических образцов. Также, усиление ГКР достаточно для получения спектра единичной клетки с использованием рамановского микроскопа. Измеряя количество формазана в отдельной клетке, можно сделать вывод о её устойчивости к антибиотику, причем усредненные результаты измерений нескольких клеток совпадают с полученными без использования микроскопа и ГКР активной мембраны. Таким образом, при помощи рамановского микроскопа возможно проводить исследования образцов вплоть до сверхнизких концентраций в несколько клеток на образец.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-65-00015, <https://rscf.ru/project/24-65-00015/>

Исследование и формирование ГКР-активных слоев на основе
высокоэнергетических материалов Al и CuO_x

**Д.В.Новиков,^{1*} А.И.Новосельцев,¹ Е.А.Лебедев,¹ Д.Г.Громов,¹ Ю.В.Чумаченко,¹
С.В.Дубков,¹ Р.М.Рязанов²**

¹*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498 Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д.1*

²*Научно-производственный комплекс «Технологический центр», 124498 Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1, стр.7*

**e-mail: tororo@bk.ru*

Сенсоры гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР-сенсоры) являются перспективным инструментом быстрого детектирования сверхмалых концентраций веществ в простых и сложных смесях. Они могут применяться в медицине, биологических клеточных и вирусных исследованиях, пищевой и химической промышленности, сельском хозяйстве и криминалистике. Основной проблемой данных сенсоров является постепенное окисление наноструктур, выступающим главным функциональным элементом структуры, атмосферой или адсорбции летучих веществ на поверхности, что приводит к снижению чувствительности и искажению получаемых данных. Существуют разные пути решения данной проблемы, к примеру покрытие функциональных наноструктур тонкой плёнкой диэлектрика для предотвращения контакта с атмосферой, либо жидкостная очистка с помощью слабых растворов кислот, деионизованной воды или органических растворителей.

Одним из перспективных путей решения данной проблемы видится применение тонкоплёночных многослойных термитных материалов (термиты). До активации материал для наночастиц распределён внутри тонкой плёнки, что предотвращает его преждевременное окисление. При активации в результате экзотермической реакции на поверхности структур данного типа происходит формирование функционального массива наночастиц и удаление адсорбированных загрязнений.

В данной работе исследовались термитные ГКР-подложки на основе Al и CuO_x. Формирование структуры производилось поочерёдным магнетронным распылением мишеней Al и CuO_x. Активация термитной ГКР-подложки производилась за счёт электрического импульса от пьезоэлемента. Морфология структуры исследовалась методом растровой электронной микроскопии. Оценка эффективности структуры в качестве ГКР-подложки проводилась с помощью Рамановского микроскопа Confotec MR200 (Белоруссия). В качестве анализируемого вещества применялись растворы малахитового зелёного оксалата (Sigma-Aldrich, CAS-No: 2437-29-8) различной концентрации. В ходе работы был вычислен коэффициент усиления структуры и предел детектирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2024-2026 гг. соглашение FSMR-2024-0012.

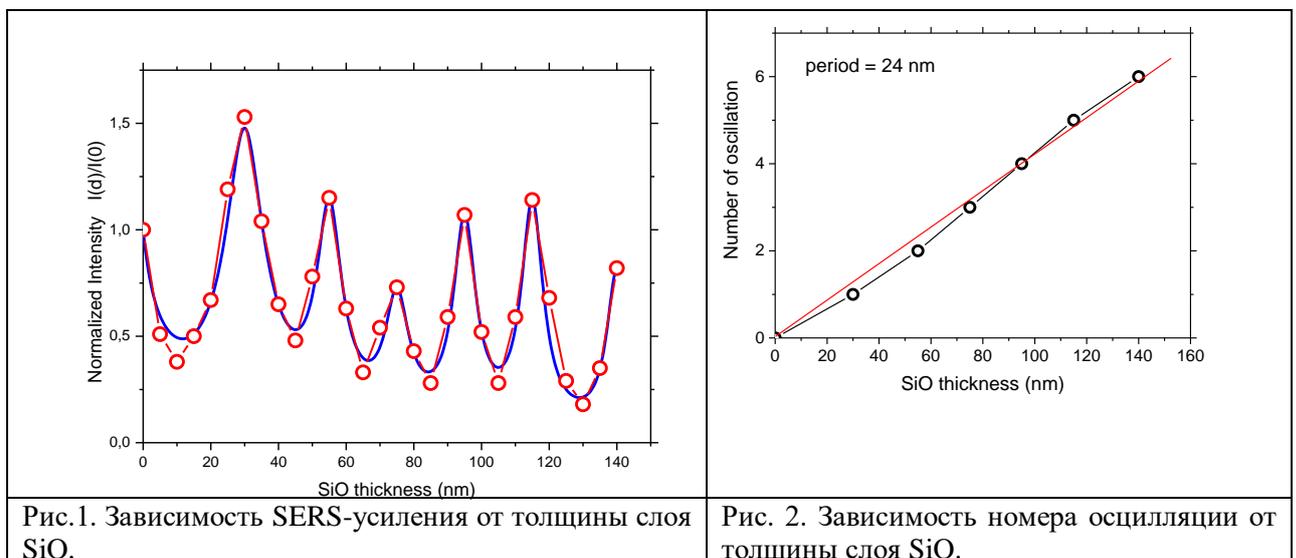
Исследование масштаба дальнего действия эффекта гигантского усиления сигнала рамановского рассеяния в структурах с комбинированным плазмон-диэлектрическим резонансом

Т.Д.Рудаков,* А.С.Астраханцева, В.Е.Кирпичев, В.В.Соловьев, И.В.Кукушкин

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

**e-mail: romzes2003@mail.ru*

Исследован масштаб дальнего действия SERS-эффекта в структурах, которые основаны на использовании комбинированных диэлектрических и металлических нано-резонаторов. Диэлектрические резонаторы создавались на подложках Si/SiO₂, в которых с помощью электронной литографии и плазменного травления изготавливались периодические структуры (диэлектрические квадратные столбики высотой 200 нм) с планарным периодом, равным длине волны лазера. Для создания металлического (плазмонного) резонатора на изготовленную периодическую диэлектрическую структуру методом термического напыления наносился толстый (60 нм) слой серебра. Для изучения масштаба дальнего действия SERS-эффекта в такой структуре серебряная поверхность покрывалась прозрачным диэлектрическим слоем SiO контролируемой толщины, а тестовые молекулы наносились поверх этого слоя. Исследовались зависимости коэффициента SERS-усиления от толщины слоя SiO. Сравнивались результаты, полученные для разных длин волн лазера, а также результаты, полученные для различных периодов структуры. Обнаружено, что коэффициент SERS-усиления не падает монотонно в зависимости от толщины слоя SiO, разделяющего металлический слой и слой тестовых органических молекул, а осциллирует от толщины этого слоя с характерным периодом ~ 25 нм. Удивительно, что значение коэффициента SERS-усиления в максимумах осцилляций может даже превышать величину SERS-усиления, измеренную при нулевой толщине SiO. Обнаруженный эффект имеет волноводную природу и может быть объяснен в терминах осцилляций коэффициента эффективной диэлектрической проницаемости комбинированной слоистой структуры, так что при определенных толщинах слоя SiO диэлектрическая проницаемость оказывается близкой к нулю, что приводит к усилению амплитуды электромагнитного поля и увеличению рамановского сигнала.



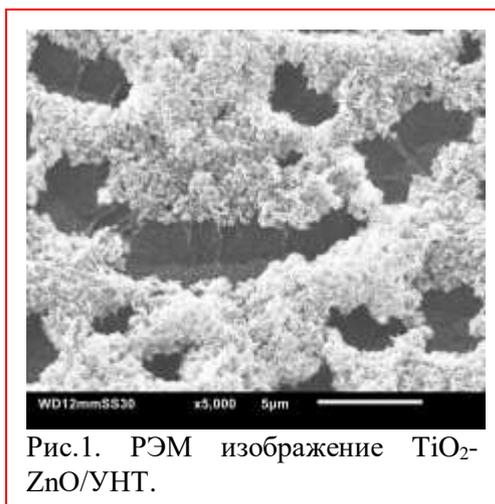
Формирование и исследование фотоактивных гетероструктур $\text{TiO}_2\text{-ZnO/УНТ}$ **Д.И.Сорокина,* К.И.Пак, А.М.Тарасов, С.С.Самсонов, С.В.Дубков, Д.Г.Громов***Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498 Зеленоград, Площадь Шокина, д.1***e-mail: larasork@gmail.com*

Рис.1. РЭМ изображение $\text{TiO}_2\text{-ZnO/УНТ}$.

Для достижения высоких показателей в области гетерогенного фотокатализа и фотоэлектрохимии особое внимание уделяется спектральной чувствительности и активности разрабатываемых материалов. Одним из подходов, повышающих фотоактивность материалов, является формирования гетероперехода для улучшенного разделения зарядов и впоследствии предотвращения рекомбинации носителей заряда. В данной работе представлена методика формирования гетероструктурных композиционных слоев $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ на подложки с углеродными нанотрубками (УНТ) методом электрофоретического осаждения.

Для проведения электрофоретического процесса изготавливалась суспензия на основе изопропилового спирта, нанопорошков TiO_2 P25, ZnO и стабилизирующих добавок лаурилсульфат натрия и гидроксипропилцеллюлоза. Морфология и элементный состав слоя исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) с приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Измерение фотоактивности образцов проводилось при помощи комплекса для фотоэлектрохимических исследований SCS10-PEC-PRO компании “Zolix”, включающего электрохимическую ячейку с электродом сравнения AgCl/Ag и платиновым электродом.

Были получены композиционные слои $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ с содержанием ZnO 30 масс. %. В результате фотоэлектрохимических исследований было обнаружено, что слои на основе TiO_2 и композиционные слои $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$, осажденные на подложку без слоя УНТ не демонстрировали фотоактивность при излучении полным спектром. Гетероструктуры $\text{TiO}_2\text{/УНТ}$ и $\text{TiO}_2\text{-ZnO/УНТ}$ продемонстрировали фотоактивность при облучении полным спектром и спектром АМ 1,5. Также было выявлено, что значение фототока композиционных слоев $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ в комбинации с УНТ больше в 5 раз по сравнению с $\text{TiO}_2\text{/УНТ}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00654, <https://rscf.ru/project/22-19-00654/>

Исследование влияния термической обработки одномерных нанокристаллов TiO₂ на фотокаталитическое восстановление CO₂

А.М.Тарасов,^{1*} С.В.Дубков,¹ Л.И.Сорокина,¹ М.Д.Кружалина,¹ Р.А.Фархудинов,¹
Д.В.Козлов,² А.В.Трегубов,² Д.Г.Громов¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498 Зеленоград, Площадь Шокина, д.1

²Ульяновский государственный университет, 432017 Ульяновск, улица Набережная р. Свияги, дом 106, корпус 1

*e-mail: bloggger4@gmail.com

Фотокаталитические материалы привлекают внимание за счёт возможности их применения в самоочищающихся покрытиях, фильтрующих элементах, разлагающих органические и неорганические загрязнения и выработки ряда органических соединений путём восстановления CO₂. Последнее применение особо интересно для создания автономных источников питания на основе топливных элементов.

В качестве фотокаталитических материалов могут использоваться металлы и полупроводниковые материалы. Особый интерес представляют собой одномерные полупроводниковые материалы, обладающие высоким аспектным отношением, что положительно сказывается на поглощении падающего излучения и низкой вероятностью рекомбинации за счёт высокой кристалличности. Сама же геометрия нитевидных кристаллов способствует к бездиффузному переносу носителей заряда вдоль оси роста кристалла. Одним из интересных полупроводниковых материалов является TiO₂. Он обладает высокой химической стабильностью и отличается низкой стоимостью. Одномерный TiO₂ возможно получать при помощи низкотемпературного гидротермального синтеза. У получаемых кристаллов можно изменять кристаллические фазы путём температурной постобработки, получая анатаз (тетрагональная), рутил (тетрагональная) и TiO₂-B (моноклинная). Данные кристаллические модификации TiO₂ отличаются своими оптическими и структурными свойствами, что влияет на их фотокаталитические свойства.

В данной работе представлена методика формирования нанонитей TiO₂ гидротермальным методом синтеза из порошкового TiO₂ в щелочном растворе. Установлено изменение кристаллических фаз при температурной обработке. Представлены результаты фотокаталитического восстановления CO₂ из газовой фазы. Основными продуктами реакции были ацетальдегид, метанол и ацетон.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00654, <https://rscf.ru/project/22-19-00654/>

Повышение чувствительности аптамерных тест-полосок для определения вируса гриппа А с помощью ГКР-эффекта

Д.С.Тихонова,¹ В.И.Кукушкин,² А.Н.Нечаев,³ Е.Г.Завьялова¹

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1*
²*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2*

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

Иммунохроматографические тест-полоски являются популярным диагностическим методом определения вирусов, однако обладают низкой чувствительностью, что является их главным недостатком. Данную проблему может решить вариация классической Рамановской спектроскопии – ГКР эффект (гигантское комбинационное рассеяние), проявляющийся на наноструктурированных субстратах серебра или золота сложной поверхности. В комбинации с инновационными узнающими агентами, аптамерами, модифицированными Рамановской меткой, были разработаны ГКР тест-полоски для определения вируса гриппа А.

В основе работы нашего сенсора лежит конформационное изменение меченного Рамановской меткой аптамера при связывании с мишенью и регистрация ГКР-сигнала метки. Для увеличения чувствительности тест-полоски было предложено создать ГКР-активные зоны на основе шероховатой трековой мембраны. Путем химического травления полимерной мембраны из полиэтилентерефталата были получены шероховатые поверхности с порами разных форм и размеров. Предполагалось, что сложная морфология поверхности обеспечит большее количество горячих точек. Также варьировались скорость напыления серебра и способ – химическое осаждение цитратных наночастиц, термическое или магнетронное напыление. Было показано, что способ напыления металла определяет воспроизводимость сенсоров и коэффициент усиления: термическое напыление и химическое осаждение создают неравномерное покрытие. Для магнетронного напыления были получены наилучшие результаты: чувствительность составила 87.5 %, относительное стандартное отклонение сигнала составило 12-16 %, а LOD составил 125 вирусных частиц в мл (H3N2).

Еще одним подходом для увеличения чувствительности в тест-полосках стала замена наночастиц золота в стандартных колориметрических аналогах на ГКР-наноагги и регистрация ГКР сигнала инкапсулированной метки при сборке тройного комплекса «аптамер-вирус-наноагг с аптамером». Цитратным методом были синтезированы монодисперсные стержневидные ГКР-активные наночастицы золота. Стержневидная форма определяет уровень ГКР-активности наночастиц и является легко воспроизводимой, что немаловажно при создании сенсоров. Далее наночастицы модифицировались ГКР-меткой с тиольным линкером, что увеличило сорбцию красителя и обеспечило максимальное приближение метки к поверхности наночастицы. Силикатная оболочка с дополнительной аминомодификацией APTEG наращивалась по методу Stober. Ожидается, что использование таких наноаггатов позволит проводить не только качественное, но и количественное определение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-65-00015, <https://rscf.ru/project/24-65-00015/>

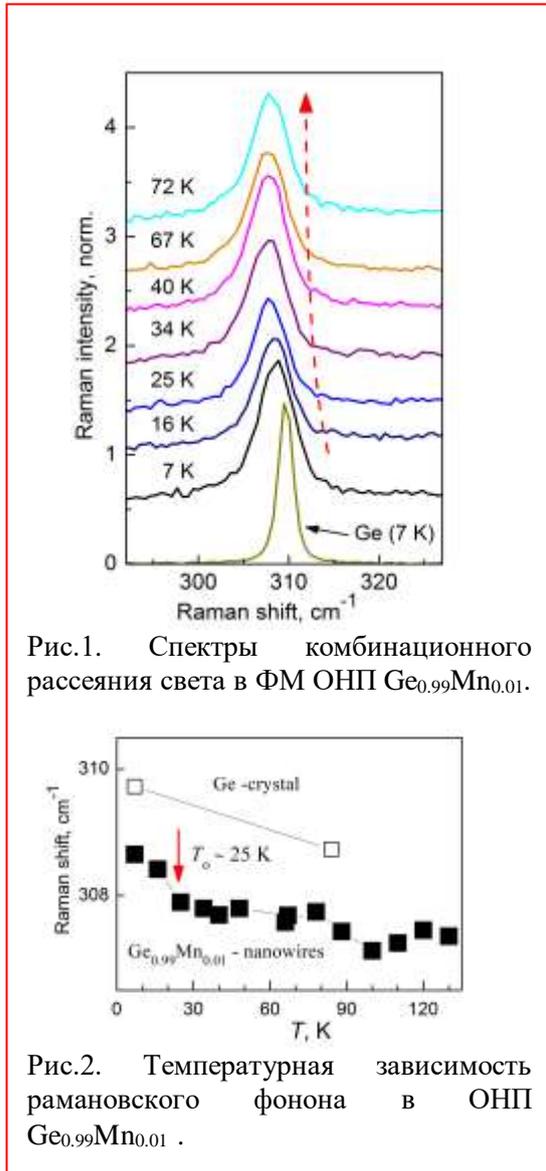
Комбинационное рассеяния света в ферромагнитных нанопроволоках $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$

С.В.Зайцев,^{1*} А.И. Дмитриев²

¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черногоровка, ул. Академика Осипьяна, д.2

²ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Черногоровка, пр-кт Академика Семенова, д.1

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



В ориентированных нанопроволоках (ОНП) диаметром ~ 60 нм на основе соединений германия $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$, наблюдается ферромагнетизм вплоть до комнатной температуры [1].

В работе детально изучены температурные зависимости оптического ЛО-фона ~ 300 cm^{-1} в спектрах комбинационного рассеяния света ОНП ферромагнитных (ФМ) $\text{Ge}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}$ (рис.1). Обнаружено, что основная линия рамановски активного фона при введении примеси Mn в германий уширяется и сдвигается в низкие частоты, а с ростом температуры происходит её существенный красный сдвиг ("смягчение") при $T_0 \approx 25$ К (рис.2).

Настоящие данные и установленная в работе [2] корреляция температурных зависимостей ферромагнитного резонанса (ФМР) локализованных магнитных ионов (Mn^{2+} и Mn^{3+}) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) подвижных дырок свидетельствуют о взаимодействии носителей заряда с магнитной подсистемой в $\text{Ge}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственных заданий ИФТТ РАН, ФИЦ ПХФ и МХ РАН № 124013100858-3.

Литература

[1] Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев, Y. Tanimoto, И.Б. Кленина, O.L. Kazakova, J.S. Kulkarni, J.D. Holmes, ФТТ 49, 285 (2007).

[2] R.B. Morgunov, A.I. Dmitriev, Y. Tanimoto, J.S. Kulkarni, J.D. Holmes, O.L. Kazakova, ЖММ 310, e824 (2007).

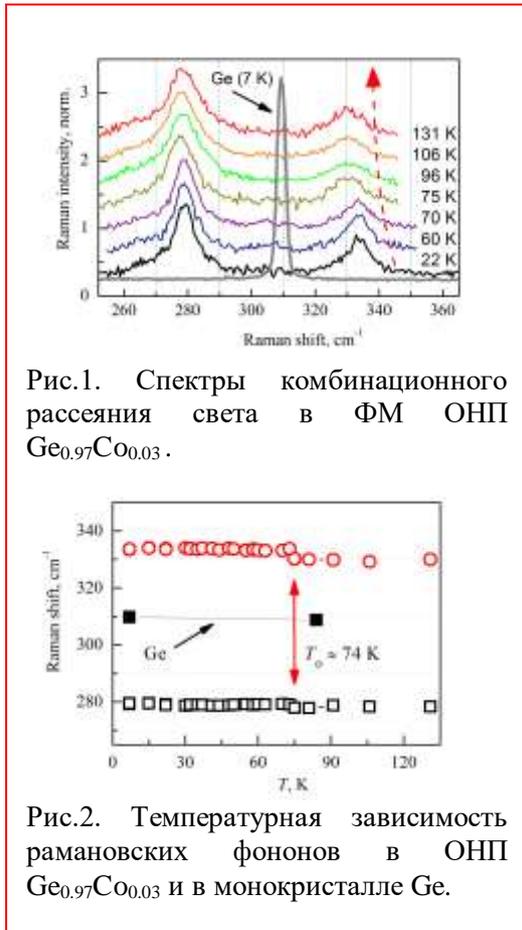
Комбинационное рассеяния света в ферромагнитных нанопроволоках $\text{Ge}_{1-x}\text{Co}_x$

С.В.Зайцев,^{1*} А.И.Дмитриев²

¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черногоровка, ул. Академика Осипьяна, д.2

²ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Черногоровка, пр-кт Академика Семенова, д.1

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



Известно, что в соединениях германия $\text{Ge}_{1-x}\text{Me}_x$, легированном примесями переходных металлов Me (Mn, Cr, Co, Fe), наблюдается ферромагнетизм вплоть до комнатной температуры [1].

В работе детально изучены температурные зависимости оптических фононов в спектрах комбинационного рассеяния света (рис.1) ориентированных нанопроволок (ОНП) ферромагнитного (ФМ) $\text{Ge}_{0.97}\text{Co}_{0.03}$. Обнаружено, что линии рамановски активных оптических фононов $\sim 280 \text{ cm}^{-1}$ и $\sim 335 \text{ cm}^{-1}$ при введении примеси Co в германий уширяются, а с ростом температуры происходит их резкий красный сдвиг ("смягчение") при $T_0 \approx 74 \text{ K}$ (рис.2).

Известно, что атомы кобальта неравномерно распределены в матрице Ge, образуя ФМ нанокластеры Co в ОНП [2]. Также в работе [2] было найдено, что в ОНП $\text{Ge}_{1-x}\text{Co}_x$ подвижные носители заряда (дырки) взаимодействуют с ФМ кластерами Co, имеющими температуру Кюри $T_C \approx 25 \text{ K}$. Дополнительно, наличие максимума на температурной зависимости произведения магнитной восприимчивости $\chi(T) \cdot T$ в исследуемых ОНП при $T_0 \approx 74 \text{ K}$ указывает на взаимодействие дырок также с ФМ кластерами сплавов (твердого раствора) $\text{Ge}_{1-x}\text{Co}_x$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственных заданий ИФТТ РАН, ФИЦ ПХФ и МХ РАН № 124013100858-3.

Литература

- [1] Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев, Ф.Б. Мушенок, О.Л. Казакова, ФТП 43, 928 (2009).
 [2] Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев, Y. Tanimoto, J.S. Kulkarni, J.D. Holmes, O.L. Kazakova, ФТТ 50, 1058 (2008).

Поверхностно-усиленное рамановское рассеяние на сетках с субмикронным серебряным покрытием

С.В.Зайцев*

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

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

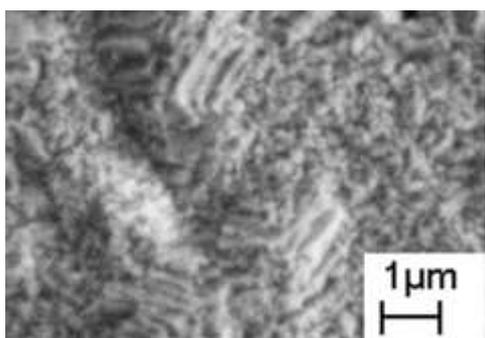


Рис.1. Морфология поверхности образца сетки подложки с серебряным покрытием (СЭМ).

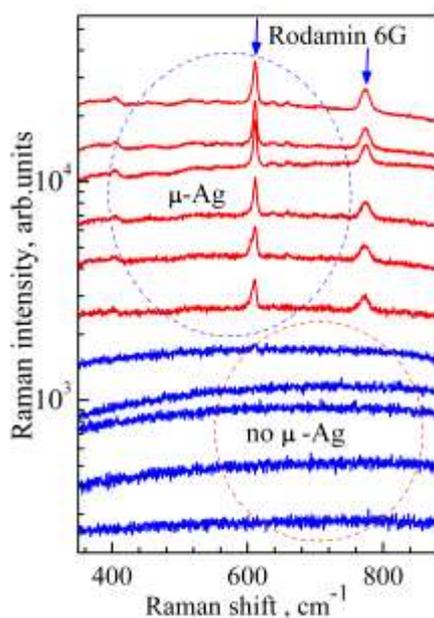


Рис.2. Спектры SERS красителя Р6Ж в разных ячейках сетки подложки с серебряным покрытием (μ -Ag). Синим цветом - спектры КРС Р6Ж на сетке без покрытия (по μ -Ag).

В работе сообщается о простом способе получения эффективных подложек с наноструктурированным серебряным покрытием (рис. 1) для исследования рамановски-активных молекул в эффекте поверхностно усиленного комбинационного рассеяния света (КРС) без использования химически пассивного слоя спейсера [1]. На никелевую сетку с золотым покрытием (толщина проволоки 0.1мм, просвет между проволоками 0,1×0,1 мм) наносили серебряное покрытие методом электроосаждения импульсным током из раствора электролита (AgNO_3 , NH_4Cl и $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) при 50°C . Морфология поверхности образца с серебряным покрытием в сканирующем электронном микроскопе (SEM) показана на рис. 1. Покрытие имеет форму многоугольных пластинок со стороной 1-2 мкм, толщина пластинок 150 – 200 нм. Пачки пластинок уложены в покрытии ортогонально плоскости так, что поверхность покрытия образована их боковыми гранями, грани ориентированы в различных направлениях.

Обработанную сетку погружали в спиртовой раствор органического красителя Родамина-6Ж (Р-6Ж) с концентрацией $5 \cdot 10^{-5}$ г/л и сушили на воздухе. Спектры КРС для Р6Ж на сетке с наноструктурированным серебряным покрытием сетки показаны на рис. 2. На нём видны сильные рамановские линии $\sim 615 \text{ cm}^{-1}$ и $\sim 778 \text{ cm}^{-1}$ молекул Р-6Ж. Для сравнения приведены спектры КРС для Р-6Ж на исходной сетке (без μ -Ag покрытия), которые имеют только ровный фон фотолюминесценции без заметных рамановских линий.

Литература

- [1] В.И. Кукушкин, А.Б. Ваньков, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 98, 72 (2013).

ISBN 978-5-6045956-4-0



9 785604 595640