

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики твёрдого тела Российской академии наук
имени Ю. А. Осипьяна**

Российский научный фонд (РНФ)

**ЧЕТВЁРТАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ»**

Сборник тезисов



*1-2 июня 2022 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

**ЧЕТВЁРТАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СИСТЕМ
БЕЗОПАСНОСТИ»**

1-2 июня 2022 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 978-5-6045956-1-9



ISBN 978-5-6045956-1-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ПЛАЗМОНЫ.

| | |
|--|----|
| <u>В. М. Муравьёв</u> , И. В. Кукушкин. Плазмоника для систем терагерцовой электроники..... | 7 |
| <u>К. Р. Джикирба</u> , А.С. Астраханцева, П.А. Гусихин, В.М. Муравьёв. Высокочастотные моды сверхрезонатора Фабри-Перо..... | 8 |
| <u>А. В. Щепетильников</u> , А.Р. Хисамеева, П. А. Гусихин, В. М. Муравьёв, Г. Э. Цыдынжапов, А. А. Дрёмин. Суб-ТГц линейный сканер..... | 9 |
| <u>В. А. Волков</u> , А. А. Заболотных. Свойства двумерных экранированных магнитоплазмон-поляритонов..... | 10 |
| А.А. Заболотных. Аналитический непertурбативный метод описания плазменных солитонов в экранированной двумерной электронной системе..... | 11 |
| <u>И.В. Андреев</u> , Н.Д. Семёнов, П.А. Гусихин, В.М. Муравьёв. Поперечные плазменные волны в двумерной электронной системе с задним затвором..... | 12 |
| П.А. Гусихин. Переход между экранированным и неэкранированным плазмоном в двумерной электронной системе..... | 13 |
| <u>П.А. Гусихин</u> , А.С. Астраханцева, А.М. Шуваев, В.М. Муравьёв. Плазменный край пропускания полупроводниковой подложки с двумерной электронной системой..... | 14 |
| <u>А.Р. Хисамеева</u> , Г.А. Николаев, С.А. Лопатина, А.В. Щепетильников. Экспериментальное наблюдение индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления бесконтактной методикой в гетеропереходе ZnO/MgZnO..... | 15 |
| <u>Н.Д. Семёнов</u> , В.М. Муравьёв, И.В. Андреев, А.А. Заболотных, И.В. Кукушкин. Исследование спектра двумерных плазмон-поляритонов в широком диапазоне магнитных полей..... | 16 |
| <u>А.М. Зарезин</u> , В.М. Муравьёв, П.А. Гусихин, И.В. Кукушкин. Экспериментальное исследование плазменных возбуждений в двумерных электронных системах в форме квадрата..... | 17 |
| <u>И.Ш. Бахтеев</u> , С.Ю. Молчанов. Моделирование мультипакторного пробоя в коаксиальных переключателях..... | 18 |
| <u>С.Ю. Молчанов</u> , И.Ш. Бахтеев. Микрополосковая линия для измерения диэлектрической проницаемости пленочных материалов..... | 19 |

СЕКЦИЯ 2. ЭКСИТОНЫ, РОТОНЫ, ПОЛЯРИТОНЫ.

| | |
|---|----|
| <u>А. В. Щепетильников</u> , А.Р. Хисамеева, С.А. Лопатина, Г.А. Николаев. Спиновый и псевдо-спиновый ферромагнетизм..... | 20 |
| А.Б. Ваньков. Аномальные магноны в квантово-холловском ферромагнетике при $\nu=2$ | 21 |
| <u>Е.И. Белозёров</u> , А.С. Журавлёв. Резонансное отражение света в лафлиновском состоянии $1/3$ | 22 |

| | |
|--|----|
| О. А. Григорьев, Л. И. Мусина, А. Б. Ваньков, <u>Л.В. Кулик</u> . Биротоны и «тёмные иерархии» ДКЭХ..... | 23 |
| <u>А.Р.Хисамеева</u> , С.А.Лопатина, Г.А.Николаев, А.В.Щепетильников. Аномальный спиновый резонанс вблизи четных факторов заполнений в режиме квантового эффекта Холла..... | 25 |
| <u>М.В.Лебедев</u> , А.Л.Парахонский, В.Е. Бисти, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин. Пространственное распределение плотности двумерных электронов по поверхности образца в нулевом магнитном поле..... | 26 |
| <u>М.В.Лебедев</u> , А.Л.Парахонский, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин. Наблюдение доменов плотности двумерных электронов в окрестности фактора заполнения $\nu=2$ | 27 |

СЕКЦИЯ 3. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

| | |
|---|----|
| <u>В.В.Соловьёв</u> , Б.Д. Кайсин, И.В.Кукушкин. Особенности низкотемпературной фотолюминесценции гетероструктур GaN/AlGaIn и высокосовершенных объемных кристаллов GaN..... | 28 |
| <u>А.А.Максимов</u> , Е.В.Филатов, И.И.Тартаковский. Неравновесные процессы в полупроводниковой лазерной структуре при возбуждении прямоугольными электрическими импульсами..... | 29 |
| <u>С.Ю. Цовьянов</u> , В.В. Землянов, М.В. Лебедев, О.В. Мисочко, А.В. Соловьёв и Г.Б. Лесовик. Новая схема безэталонной квантовой фотометрии..... | 31 |
| <u>Д.А.Громыко</u> , С.А.Дьяков, Н.А.Гиппиус, С.Г.Тиходеев, А.С.Астраханцева, Я.В.Федотова, В.В.Соловьёв, И.В.Кукушкин. Использование резонансов Фабри-Перо метаструктуры-подложки при наблюдении поверхностно-усиленного рамановского рассеяния света..... | 32 |
| А.С. Бричкин, Г.М. Гольшков, <u>А.В. Черненко</u> . Влияние дефектов интерфейсов на фотолюминесценцию инкапсулированных слоев дихалькогенидов переходных металлов..... | 33 |
| <u>Г.М. Гольшков</u> , А.С. Бричкин, А.В. Черненко. Штарковский сдвиг линий фотолюминесценции экситонов в гетероструктурах с монослоями MoSe ₂ | 34 |
| <u>О.В. Мисочко</u> , М.В.Лебедев. Манипулирование электрон-фононным взаимодействием в GaAsp-типа и SnSe посредством аттосекундного оптического контроля..... | 35 |
| С.В. Зайцев. Кинетика свечения ионов Eu ³⁺ в вольфраматах (Lu _{1-x} Eu _x) ₂ (WO ₄) ₃ и молибдатах (Lu _{1-x} Eu _x) ₂ (MoO ₄) ₃ | 36 |
| <u>Э. Степанец-Хуссейн</u> , А.Б.Ваньков, DulalKrishnaSaha, MdShafiqulIslamSarker, MdAbuHasan. Первый в мире портативный рамановский экспресс-анализатор цветных уличных наркотиков, способный обнаруживать метамфетамин в <i>Ябе</i> и устанавливать концентрации метамфетамина и кофеина..... | 37 |
| <u>Э. Степанец-Хуссейн</u> , В.Е. Кирпичёв, L.Nagli, M. Pear. Прорыв в оптическом приборостроении: компактный рамановский поляриметр..... | 39 |
| <u>Д. А. Грибанёв</u> , В. И. Кукушкин, Е. Г. Завьялова. Исследование адсорбции катионных раман-активных красителей на серебряные наночастицы. Синтез многослойных наночастиц Ag-Au с включённым между слоями металлов раман-активным красителем.... | 40 |

Е. Г. Завьялова, В. И. Кукушкин, О. В. Криставчук, А. Н. Нечаев. SEL-аптасенсоры на основе трековых мембран для определения вируса гриппа А.....41

СЕКЦИЯ 4. ЭКСИТОНЫ, РОТОНЫ, ПОЛЯРИТОНЫ (2).

А.А.Деменев, С.Н.Терешко, С.С.Гаврилов, В.Д.Кулаковский. Поляризационная динамика спиновых микрорезонаторных экситонных поляритонов в туннельно-связанных двойных ловушках в условиях импульсной резонансной накачки.....42

А.А.Деменев, Д.Ю.Казьмин, И.М.Фрадкин, В.Д.Кулаковский, В.Н.Антонов и Н.А.Гиппиус. Преобразование поляризации излучения квантовых точек в волноводных метаструктурах с помощью плазмонных решёток.....43

Л.В.Кулик, А.А. Загитова. Спиновый транспорт в квантово-холловском изоляторе.....44

А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, А.В. Черненко. Прямые и не прямые экситоны и трионы в двойной квантовой яме $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ в Ван-дер-Ваальсовых гетеструктурах.....45

А.В.Горбунов, А.В.Ларионов, В.Б.Тимофеев. Когерентные свойства конденсата магнитоэкситонов в квантово-холловском диэлектрике.....46

Плазмоника для систем терагерцовой электроники

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

Центральным вопросом физики низкоразмерных электронных систем является изучение одночастичных и коллективных элементарных возбуждений системы. Одним из основных типов коллективных возбуждений двумерной электронной системы (ДЭС) является волна зарядовой плотности – плазмон. Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах интенсивно изучаются уже более полувека. Отчасти такой интерес связан с множеством уникальных свойств, отличающих двумерные (2D) плазмоны от их трехмерных аналогов.

В большинстве твердотельных полупроводниковых систем двумерный слой контактирует с множеством электродов (контакты, затворы). До недавнего времени считалось, что электроды вносят незначительное возмущение в свойства плазменных волн в ДЭС. Недавно было экспериментально и теоретически установлено, что данное предположение имеет целый ряд ограничений. Как следствие, был открыт ряд новых двумерных плазменных возбуждений – релятивистские плазмоны [1], «проксимити» плазмоны (proximityplasmons) [2], LC плазменные моды, а также «сверхсветовые» электромагнитные плазмоны [3]. Экспериментальное исследование этих разновидностей плазменных волн привело к разработке целого ряда новых подходов для создания устройств терагерцовой электроники. Среди них следует выделить два направления, разработанных авторами доклада. С одной стороны, падающее электромагнитное излучение может быть преобразовано в распространяющееся вдоль ДЭС плазмон-поляритонную волну. Таким образом электромагнитное поле локализуется вблизи поверхности на масштабах порядка длины волны плазмона. Из-за сильной локализации поля, вблизи поверхности наблюдается сильное усиление локального электромагнитного поля, что может применяться для создания высокочувствительных детекторов терагерцового излучения. Вторым направлением является использование электромагнитных плазменных волн для контролируемого изменения фазы электромагнитного излучения. Данный подход может использоваться для построения матричных активных фазированных антенных решеток.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] Muravev V. M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V., Novel Relativistic Plasma Excitations in a Gated Two- Dimensional Electron System, Phys. Rev. Lett., V. 114, P. 106805 (2015).
- [2] Zabolotnykh A.A., Volkov V.A., Interaction of gated and ungated plasmons in two-dimensional electron systems, Phys. Rev. B., V. 99, P. 165304 (2019). Muravev V. M., Gusikhin P.A. et al., Two-dimensional plasmon induced by metal proximity, Phys. Rev. B, V. 99, P. 241406 (2019).
- [3] Shuvaev A., Muravev V.M., Gusikhin P.A. et al., Discovery of Two-Dimensional Electromagnetic Plasma Waves, Phys. Rev. Lett., V. 126, P. 136801 (2019).

Высокодобротные моды сверхрезонатора Фабри-Перо

К.Р.Джикирба,^{1,2*} А.С.Астраханцева,^{1,2} П.А.Гусихин,¹ В.М.Муравьёв¹¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2²МФТИ (НИУ), 141700, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9

*e-mail: ki805rill@mail.ru

Терагерцовая и субтерагерцовая квазиоптика имеют широкое практическое применение в различных системах неразрушающего контроля, детектирования веществ и контроля безопасности. Одной из важных задач данной области является проблема локального усиления поля вблизи резонансной структуры для улучшения систем детектирования терагерцового излучения. Нашей целью было исследовать механизм локального усиления поля возникающих в структурах, аналогичных SERS.

Образцы представляют собой плоскопараллельную пластину диэлектрика, с периодически напылёнными металлическими полосами с обеих сторон, сдвинутыми относительно друг друга на полпериода. Мы теоретически и экспериментально изучили поверхностные плазменные волны в данной структуре и их гибридизацию с резонансами Фабри-Перо в полупроводниковой подложке.

Для наблюдения эффекта использовалась открытая квазиоптическая схема для измерения пропускания изучаемого образца. Детектирование резонанса проводилось по характерному отклику в зависимости трансмиссии от частоты. На рисунке показаны резонансы при различных периодах структуры из золота на поверхности кремния толщиной 470 мкм, ширина полоски составляла $\frac{1}{4}$ периода. Видно, что амплитуда резонанса уменьшается при приближении к резонансу Фабри-Перо, показанному фиолетовой линией.

На основе измерений получена дисперсия резонанса, показанная на рисунке 2. Красной линией показана дисперсия, полученная из компьютерного моделирования, чёрным цветом – дисперсия света в вакууме и в диэлектрике, а зелёным пунктиром показано положение первого резонанса Фабри-Перо подложки.

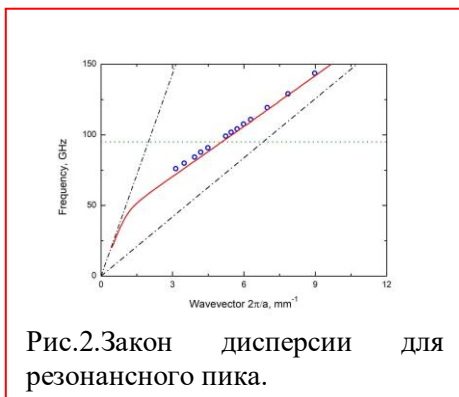


Рис.2.Закон дисперсии для резонансного пика.

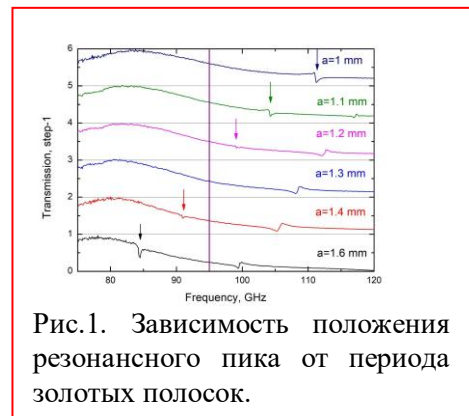


Рис.1. Зависимость положения резонансного пика от периода золотых полосок.

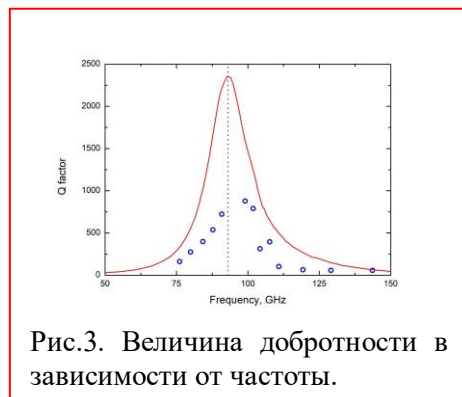


Рис.3. Величина добротности в зависимости от частоты.

Результаты эксперимента полностью согласуются с теорией. При этом добротность резонанса резко увеличивается, достигая максимума на частоте Фабри-Перо, что видно на рисунке 3, где красным показаны результаты моделирования. На данной структуре нами наблюдались резонансы с рекордной для терагерцового диапазона добротностью, близкой к

Суб-ТГц линейный сканер

А.В.Щепетильников, *А.Р.Хисамеева, П.А.Гусихин, В.М.Муравьев, Г.Э.Цыдынжапов, А.А.Дрёмин

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

Целый класс самых разнообразных задач по неразрушающему контролю как в сфере промышленного производства, так и в области досмотровых систем безопасности может решаться с применением технологии построения изображения в суб-терагерцовом частотном диапазоне. Во многом это обусловлено уникальными свойствами такого излучения. Достаточное количество разнообразных материалов, использующихся при производстве, а именно, ткани, пластики, керамики, различные резины и т.д. – относительно прозрачны в данном частотном диапазоне, а значит, внутренняя структура, в том числе и внутренние дефекты, изделий из данных материалов может быть тщательно инспектирована. Альтернативные подходы, такие как рентгеновские системы, обладают существенно большей стоимостью, а также несут потенциальный вред здоровью операторов.

В рамках данной работы для решения указанной задачи был разработан ультрабыстрый линейный сканер, работающий на частоте 300 ГГц. Сканер состоит из вмонтированной в конвейер камеры, содержащей линейный массив детекторов, источника излучения на базе лавинно-пролётного диода и умножения частоты, а также оптической системы, формирующей пучок в виде вытянутого вдоль камеры эллипса. Было показано, что разрешение системы достигает значения в 2 мм, а динамический диапазон составляет 25дВ. Работоспособность системы была продемонстрирована на реальных объектах, например, на деталях из дерева и пластика с внутренним дефектом (см. рис. 1).

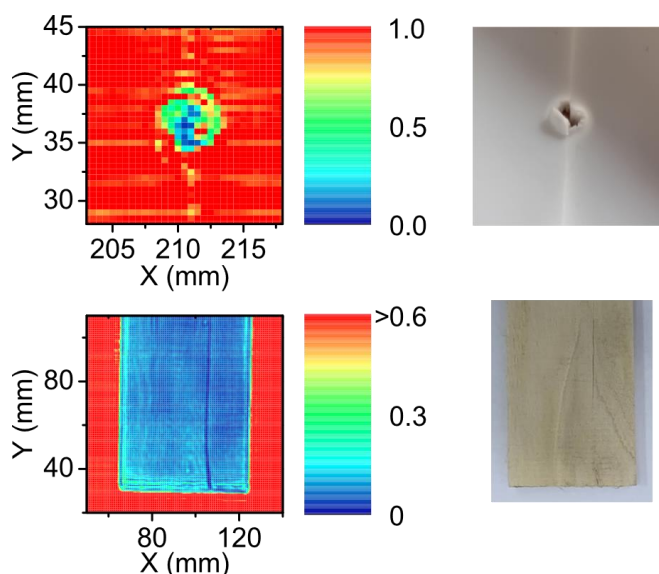


Рис.1.Изображения, полученные в суб-ТГц (слева) и оптическом (справа) частотном диапазоне дефектов в детали из пластика и дерева.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Свойства двумерных экранированных магнитоплазмон-поляритонов

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

Влияние металлического затвора на спектр двумерных(2D) плазмонов и магнитоплазмонов в пренебрежении электромагнитным запаздыванием давно и хорошо известно и сводится к экранированию межэлектронного взаимодействия и, как результат, смягчению длинноволнового спектра плазмонов. В докладе рассмотрено влияние на плазмоны эффектов электромагнитного запаздывания через волноводные эффекты в диэлектрической подложке. Показано, что учет вышеуказанных факторов может качественно изменить отклик системы на внешние электромагнитные поля.

В качестве примера рассмотрим возможное влияние электромагнитного запаздывания в спектре магнитоплазмон-поляритонов на циклотронный резонанс. Эффект обусловлен коллективной (плазмон-поляритонной) природой циклотронного резонанса в 2D системе с тыловым затвором, а более конкретно, взаимодействием электронов на циклотронных орбитах с электромагнитными модами диэлектрической подложки[1].

В отсутствие магнитного поля взаимодействие 2D плазмонов с модами диэлектрического волновода (подложки) приводит к формированию семейства волноводных плазмон – поляритонных мод, две нижние из которых обладают бесщелевой дисперсией и ТМ симметрией. Магнитное поле гибридизирует разные моды. Тем не менее, разделение всех мод на продольные и поперечные (ТМ-ТЕ классификация), обычно справедливо лишь в отсутствие магнитного поля, восстанавливается в пределе сильных полей. Найдены спектры и магнитодисперсия полученных мод [2]. Даже слабое магнитное поле открывает частотную щель, линейную по полю, в спектре одной из нижних мод. Эта щель и равна частоте перенормированного циклотронного резонанса. В системе с тыловым затвором перенормировка положения и ширины линии циклотронного резонанса может быть сколь угодно сильной. Проведено сравнение с экспериментом.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ 21-12-00287.

Литература

- [1] A.A. Zabolotnykh, V.A. Volkov, Phys. Rev. B **103**, 125301 (2021).
- [2] А.А.Заболотных, В. А. Волков, Письма в ЖЭТФ, **115**, 163 (2022).

Аналитический непертурбативный метод описания плазменных солитонов в экранированной двумерной электронной системе

А.А.Заболотных*

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

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

Работа посвящена солитонам — нелинейным уединенным волнам, сохраняющим свой профиль при распространении. Плазменные солитоны в бесконечной двумерной (2D) электронной системе (ЭС), вблизи которой расположен идеально проводящий металлический электрод (затвор), т.е. в экранированной 2D ЭС, впервые рассматривались в статье [1]. В этой статье для описания нелинейных плазменных волн использовался пертурбативный подход, заключающийся в разложении уравнения Пуассона, связывающего электрический потенциал и плотность заряда в 2D ЭС, по параметру qd , где d — расстояние между затвором и 2D ЭС, qv в линейном режиме соответствует волновому вектору плазмона, а в нелинейном — обратной характерной длине неоднородности волны (обратной «ширине» солитона). При этом, параметр qd считался много меньшим единицы. Использование такого подхода приводило к тому, что в координатном пространстве для плотности заряда в 2DЭС получалось уравнение типа Кортевега – де Вриза, имеющего известные решения в виде уединенных волн. Недостатком данного подхода является то, что из-за разложения по параметру $qd \ll 1$, было возможно рассмотрение только режима слабой нелинейности, в котором ширина солитона велика по сравнению с d , а возмущение концентрации, связанное с солитоном, мало по сравнению с равновесной концентрацией.

В данной работе вместо разложения по параметру qd для описания плазменных солитонов в экранированной 2D ЭС используется непертурбативный модельный подход, заключающийся в замене ядра в интегральной форме уравнения Пуассона на более простое (по аналогии с методом, применённым в [2] для поиска спектра краевых плазменных возбуждений). Данный подход, также как и метод разложения по параметру qd , позволяет решить задачу аналитически. Однако, помимо этого, в рамках метода замены ядра можно рассмотреть нелинейные плазменные волны с характерным масштабом неоднородности вплоть до d и возмущением концентрации порядка равновесной.

В рамках использованного метода замены ядра получено [3], что солитоны существуют только если их скорость u лежит в диапазоне от v_p до $2v_p$, где v_p — скорость линейных плазмонов в длинноволновом пределе. Ограничение на скорость $u > v_p$ уже было известно [1], в то время как условие $u < 2v_p$ является новым результатом. Также, в работе найдены и аналитически проанализированы остальные параметры солитона — амплитуда и ширина — в зависимости от скорости.

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

Литература

[1] А. О. Говоров, В. М. Ковалев, А. В. Чаплик, Письма в ЖЭТФ, 70, 479 (1999).

[2] A. L. Fetter, Phys. Rev. B, 32, 7676 (1985).

[3] А.А. Zabolotnykh, arXiv: 2202.04503 (2022).

Поперечные плазменные волны в двумерной электронной системе с задним затвором

И.В.Андреев,* Н.Д.Семёнов, П.А.Гусихин, В.М.Муравьёв

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

**andreev@issp.ac.ru*

Резонансное поглощение электромагнитного СВЧ излучения двумерной электронной системой (ДЭС) может проходить посредством двух основных механизмов: возбуждения обыкновенных продольных плазменных волн и возбуждения недавно открытых [1, 2] поперечных плазменных волн.

В настоящей работе магнитодисперсия гибридных поперечных плазмон-поляритонных возбуждений в образцах ДЭС большого (до 7 мм) латерального размера, оснащенных задним затвором, исследуется по данным спектроскопии резонансного СВЧ-поглощения. Эксперименты проводились на высококачественных гетероструктурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. Исследовано взаимодействие поперечных плазменных волн в ДЭС с фотонными модами (резонансами Фабри-Перо) полупроводниковой подложки. Показано, что в слабых магнитных полях наименьшее по частоте плазмон-поляритонное возбуждение следует за магнитодисперсией циклотронного резонанса, перенормированной за счет релятивистских эффектов запаздывания [3]. Исследована гибридизация плазменных волн с резонансами Фабри-Перо и установлено, что латеральный размер ДЭС не влияет на закон дисперсии поперечных плазмон-поляритонов.

Установлены определённые закономерности влияния таких параметров, как толщина подложки и плотность двумерных электронов, на магнитодисперсию и ширину линии гибридных плазмон-поляритонных мод. Показано, что увеличение как электронной плотности, так и толщины подложки приводит к увеличению силы взаимодействия поперечных мод двумерной плазмы с резонансами Фабри-Перо подложки. Этот результат позволяет охарактеризовать механизмы взаимодействия поперечных плазменных волн со светом и поэтому важен для проектирования плазмон-фотонных интегрированных структур на кристалле.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] P.A. Gusikhin, V.M. Muravev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 102, 121404(R) (2020).
- [2] A. Shuvaev, V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, J. Gospodarič, A. Pimenov, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 126, 136801 (2021).
- [3] A.A. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 103, 125301 (2021).

Переход между экранированным и неэкранированным плазмоном в двумерной электронной системе

П.А.Гусихин*

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

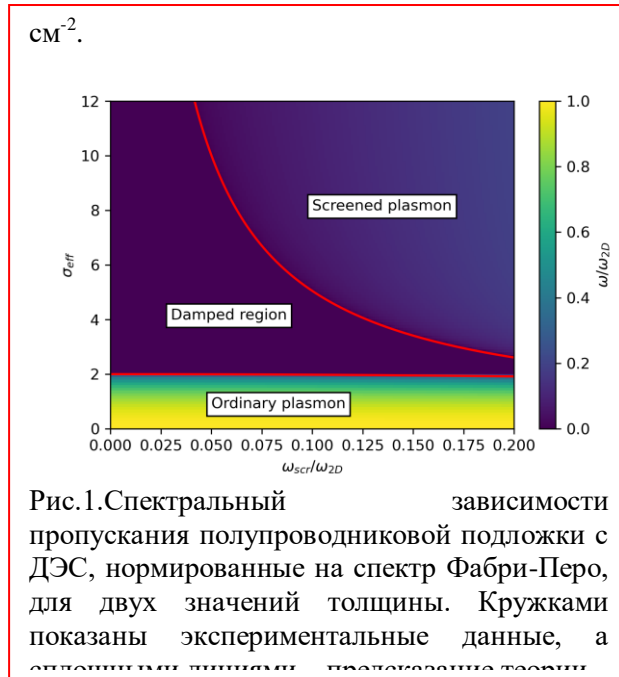


Рис.1. Спектральная зависимость пропускания полупроводниковой подложки с ДЭС, нормированные на спектр Фабри-Перо, для двух значений толщины. Кружками показаны экспериментальные данные, а сплошными линиями – теоретическое решение уравнения (1).

Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах изучаются уже более полувека [1]. Кроме обычных плазменных возбуждений были изучены также плазмоны в экранированной двумерной электронной системе, в том числе частично экранированной [2, 3].

В связи с современным развитием электронных, плазмонных и фотонных устройств возникает интерес к изучению свойств двумерных электронных систем, экранированных полупрозрачным слабо проводящим металлическим затвором. В данной работе был теоретически исследован переход от случая неэкранированного двумерного плазменного возбуждения к экранированному плазмону при

увеличении проводимости затвора. Оказалось, что частота плазмона в зависимости от проводимости затвора σ и волнового вектора k в предположении $kd \ll 1$, где d – расстояние между двумерной электронной системой и затвором, определяется уравнением:

$$\omega(\omega^2 - \omega_{2D}^2) + i \frac{4\pi\sigma k}{\varepsilon + 1} (\omega^2 - \omega_{scr}^2) = 0,$$

где ω_{2D} – частота неэкранированного двумерного плазмона, ω_{scr} – частота экранированного плазмона. На Рис.1 показано решение данного уравнения в нормированных величинах. Интересной особенностью является наличие области, в которой плазменные возбуждения полностью подавлены. Эта область разделяет области обычного двумерного плазмона и экранированного плазмона.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] А.В. Чаплик, ЖЭТФ 62, 746-753 (1972).

[2] А.А. Zabolotnykh and V.A. Volkov, Phys. Rev. B 99, 165304 (2019).

[3] V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, A.M. Zarezin, I.V. Andreev, S.I. Gubarev, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 99, 241406(R) (2019).

Плазменный край пропускания полупроводниковой подложки с двумерной электронной системой

П.А.Гусихин,^{1*} А.С.Астраханцева,¹ А.М.Шуваев,² В.М.Муравьев¹

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

²Institute of Solid State Physics, TUWien, 1040, Vienna, Austria

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

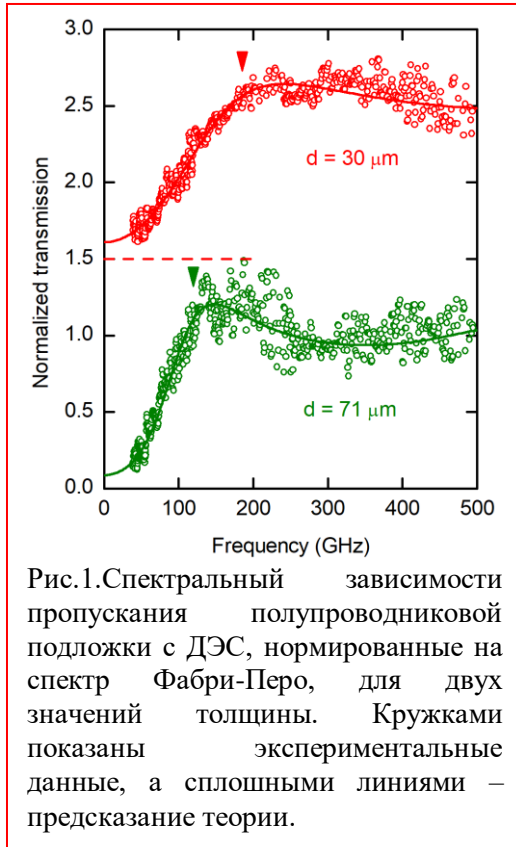


Рис.1. Спектральная зависимость пропускания полупроводниковой подложки с ДЭС, нормированные на спектр Фабри-Перо, для двух значений толщины. Кружками показаны экспериментальные данные, а сплошными линиями – предсказание теории.

Недавно в полупроводниковой подложке, содержащей двумерную электронную систему, были открыты поперечные плазменные возбуждения [1,2]. До этого момента поперечные плазменные возбуждения наблюдались исключительно в трёхмерных электронных системах. Одним из замечательных явлений, связанных с ними, является ультрафиолетовая прозрачность металлов. На частоте выше плазменной в металлах начинает распространяться поперечная плазменная волна, которая переносит энергию электромагнитной волны внутри металла. В данной работе показано, что аналогичная частота отсечки возникает и в двумерной электронной системе, расположенной на полупроводниковой подложке [3].

Частота двумерного поперечного плазменного возбуждения определяется формулой:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_s e^2}{m^* (\varepsilon - 1) d}}$$

где n_s – концентрация электронов, m^* – эффективная масса электронов, ε –

диэлектрическая проницаемость материала подложки, d – толщина подложки. Оказывается, что ниже данной частоты пропускание существенно подавлено, двумерная система отражает электромагнитное излучение. А выше этой частоты пропускание системы практически совпадает с пропусканием полупроводниковой подложки без двумерной электронной системы (Рис.1).

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 102, 121404(R) (2020).
- [2] A. Shuvaev, V.M. Muravev, P.A. Gusikhin, J. Gospodarič, A. Pimenov, and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. 126, 136801 (2021).
- [3] A.S. Astrakhantseva, A. Shuvaev, P.A. Gusikhin, A. Pimenov, I.V. Kukushkin, and V.M. Muravev, Appl. Phys. Lett. 120, 031104 (2022).

Экспериментальное наблюдение индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления бесконтактной методикой в гетеропереходе ZnO/MgZnO

А.Р.Хисамеева,¹ Г.А.Николаев,² С.А.Лопатина,³ А.В.Щепетильников¹

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

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

³*НИУ ВШЭ, 101000 Москва, ул. Мясницкая, д.20*

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

В двумерных электронных системах (ДЭС) с достаточно высокой подвижностью под воздействием микроволнового излучения в слабых магнитных полях уже более 20 лет активно исследуется явление гигантских осцилляций продольного магнетосопротивления (Microwave-induced resistance oscillations – MIRO) [1, 2]. Однако, физическая интерпретация происхождения данного явления неравновесного переноса всё ещё является предметом широкой дискуссии. Ряд противоречий теории с экспериментальными результатами привели к возникновению альтернативных подходов, которые связывают причины возникновения MIRO с влиянием краевых и приконтактных областей [3]. Вследствие этого, экспериментальное исследование вклада данных областей или его отсутствия на индуцированные микроволновым излучением осцилляции магнетосопротивления представляет огромный интерес.

В рамках настоящей работы было проведено подробное исследование индуцированных микроволновым излучением осцилляций высокочастотной проводимости в гетеропереходе ZnO/MgZnO. Существенным отличием данной ДЭС от стандартных структур GaAs/AlGaAs является наличие большой эффективной массы двумерных электронов, что может оказывать влияние на период осцилляций магнетосопротивления. В качестве измерительного метода использовалась бесконтактная методика, которая основывалась на анализе сигнала пропускания между двумя Т-образными антеннами, емкостно связанными с двумерной электронной системой. Данный подход позволяет исключить влияние приконтактных областей на MIRO, и уже был успешно апробирован на стандартных гетероструктурах GaAs/AlGaAs [4]. Принципиальной важностью данной работы является проверка универсальности обнаруженных ранее свойств MIRO на совершенно другой материальной системе, сильно отличающейся по ключевым свойствам. Также существенным преимуществом экспериментального метода является отсутствие омических контактов или нанесенной металлизации на поверхность образца, что дает дополнительную информацию для понимания природы происхождения данного явления.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] M. A. Zudov, R. R. Du, J.A. Simmons, and J. L. Reno, Phys. Rev. B 64, 201311(R) (2001).
 [2] P.D. Ye, L.W. Engel, D.C. Tsui, J.A. Simmons, J. R. Wendt, G.A. Vawter, and J. L. Reno, Appl. Phys. Lett. 79, 2193 (2001).
 [3] S. A. Mikhailov, Phys. Rev. B 70, 165311 (2004).
 [4] A. V. Shchepetilnikov, A.R. Khisameeva, Yu.A. Nefyodov, S. Schmult, and I.V.Kukushkin, Phys. Rev. B 102, 075445 (2020).

Исследование спектра двумерных плазмон-поляритонов в широком диапазоне магнитных полей

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

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

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

*e-mail: nikolai.semenov@issp.ac.ru

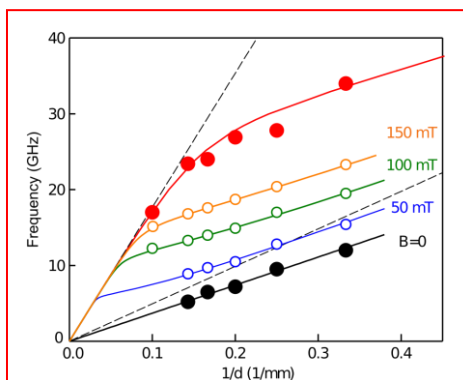


Рис. 1. Дисперсия двумерных плазмон-поляритонов при различных значениях магнитного поля. Пунктирные линии соответствуют «световым конусам». Красные точки соответствуют асимптотикам в сильных магнитных полях. Красная кривая — дисперсия моды ТМ₀ в подложке. Сплошные кривые — теоретические расчеты.

Гибридизация между падающим электромагнитным излучением и двумерной электронной системой (ДЭС) описывается на языке квазичастиц, известных как плазмонные поляритоны. В режиме особо сильного взаимодействия света с электронной системой существенными становятся эффекты запаздывания, что отражается, в том числе, в характерном зигзагообразном поведении магнитодисперсии неэкранированного двумерного плазмона [1]. В нынешней работе продемонстрировано, что если подавить сильное излучательное уширение линии плазменного резонанса с помощью заднего затвора, то удастся избавиться от обозначенной особенности и измерить спектр плазмонных поляритонов в широком диапазоне магнитных полей.

Показано, что в отсутствие магнитного поля экспериментально измеренные резонансные частоты микроволнового поглощения ДЭС с высокой точностью соответствуют предсказанным теоретически [2] для экранированного двумерного плазмона с учётом эффектов запаздывания. В ненулевых магнитных полях частоты плазменных резонансов при заданном волновом векторе увеличиваются, что соответствует «объемной» ветке магнитоплазменных возбуждений. Также при анализе экспериментальных данных было обнаружено, что дисперсия плазмон-поляритонов в асимптотическом пределе бесконечных магнитных полей хорошо повторяет дисперсию ТМ₀-моды диэлектрической подложки исследуемого образца [3].

Полученные результаты могут найти приложение в областях интегрированной фотоники и метаматериалов, поскольку выявляют детальный механизм взаимодействия света с ДЭС. В частности, они показывают, какими волноводными модами необходимо управлять для создания новых типов плазмонных устройств на чипе.

Литература

- [1] I.V. Kukushkin, J.H. Smet, S.A. Mikhailov, D.V. Kulakovskii, K. VonKlitzing and W. Wegscheider, PRL, 90(15), p.156801 (2003).
 [2] I.V. Andreev, V.M. Muravev, N.D. Semenov, and I.V. Kukushkin, PRB, 103(11), p.115420 (2021).
 [3] I.V. Andreev, V.M. Muravev, N.D. Semenov, A.A. Zabolotnykh and I.V. Kukushkin, PRB, 104(19), p.195436 (2021).

Экспериментальное исследование плазменных возбуждений в двумерных электронных системах в форме квадрата

А.М.Зарезин^{1,2*}, В.М.Муравьев¹, П.А.Гусихин¹, И.В.Кукушкин¹

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

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

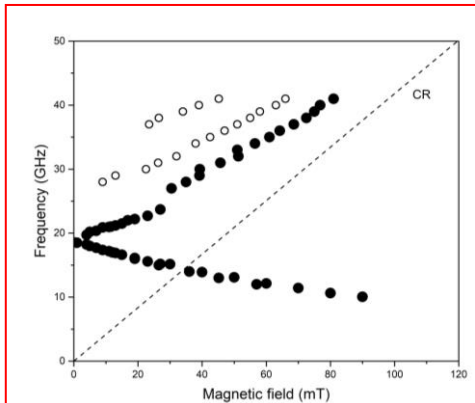


Рис.1. Зависимость резонансной частоты плазменных возбуждений от приложенного перпендикулярно образцу магнитного поля в ДЭС в форме квадрата со стороной 1 мм. Концентрация двумерных электронов $n=1.6 \cdot 10^{11}$

Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах (ДЭС) обладают рядом уникальных свойств, являясь объектом теоретических и экспериментальных исследований на протяжении более чем 50 лет. Такой интерес связан с возможностью изменения свойств 2D плазменных возбуждений в широком диапазоне с помощью изменения концентрации, модификации окружения ДЭС или приложения магнитного поля. Помимо этого, на свойства плазменных мод существенным образом влияет геометрия ДЭС.

В работе представлено исследование плазменных возбуждений в ДЭС в форме диска и в форме квадрата. Эксперименты проводились на GaAs/AlGaAs гетероструктурах при гелиевых температурах в криостате со сверхпроводящим соленоидом. В качестве контрольного образца использовалась ДЭС в форме диска с диаметром, равным стороне квадрата. Оказалось, что

резонансная частота фундаментальной моды в квадрате практически совпадает с частотой аналогичной моды в диске. Помимо этого, плазменные моды в ДЭС в форме квадрата продемонстрировали особенность, не наблюдаемую в ДЭС в форме диска. В квадрате наблюдалась гибридизация плазменных мод (рис. 1). Данный эффект абсолютно отсутствует в хорошо изученной теоретически и экспериментально геометрии диска [1,2]. Гибридизация систематически наблюдалась в квадратах разного размера. Также была обнаружена зависимость величины частоты Раби от концентрации 2D электронов и размера подложки.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] Alexander L. Fetter, Phys. Rev. B 33, 5221 (1986).

[2] B.D. C. Glattli, E. Y. Andrei, G. Deville, J. Poitrenaud, and F. I. B. Williams, Phys. Rev. Lett. 54, 1710 (1985).

Моделирование мультипакторного пробоя в коаксиальных переключателях

И.Ш.Бахтеев,* С.Ю.Молчанов

ИФТТРАН им. Ю.А.

Осипьяна, 142432, Черногоровка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

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

Высокие уровни мощности подразумевают, наличие электромагнитных полей высокого уровня в устройствах, которые могут вызвать два известных эффекта: коронный пробой, когда устройство заполнены любым видом газа, и мультипакторный пробой при работе в условиях вакуума.

В условиях, близких к вакууму, длина свободного пробега электронов превышает размеры устройства. В этой ситуации свободные электроны, которые ускоряются электромагнитными полями, могут двигаться без сопротивления до тех пор, пока не ударяются о любую поверхность изделия. Если энергия удара достаточно высока, вторичные электроны могут высвобождаются с поверхности (рис. 1). Затем, если полученный электронный сгусток входит в резонанс с полем, он будет периодически воздействовать на поверхность устройства, высвобождая все больше и больше электронов, что в конечном итоге приводит к электронной лавине. Это явление известно как мультипакторный пробой [1].



Рис.1. Схема возникновения мультипакторного пробоя.

Мультипакторный пробой приводит к нагреву, отражению мощности и искажению сигнала, что отрицательно влияет на правильную работу прибора. В конечном счете, сильный мультипакторный пробой приводят к выделению газа и локальному увеличению давления, которое инициирует коронный разряд и может привести к необратимому повреждению компонентов.

По вопросу снижения мультипакторного пробоя в литературе в основном отмечены два подхода. Первый – выход из зоны мультипакторного пробоя изменением частоты и/или зазора (т.е. геометрии). Второй (гораздо более распространенный) – уменьшение коэффициента вторичной эмиссии (КВЭ) путем модифицирования поверхности или нанесения покрытия с низким КВЭ.

Была рассчитана модель коаксиального переключателя с покрытием из золота и молибденом. Так как рабочий диапазон ниже 1.5 ГГц, а толщина покрытия из молибдена не более 3 мкм, то это не скажется на электрических характеристиках, из-за толщины скин-слоя молибдена на этих частотах, превышающих 4 мкм. Зависимость мультипакторного пробоя от частоты для покрытий из золота и молибдена представлена на рис.2. Полученные результаты говорят о возможности изготовления коаксиального переключателя с необходимым запасом по уровню рабочей мощности.

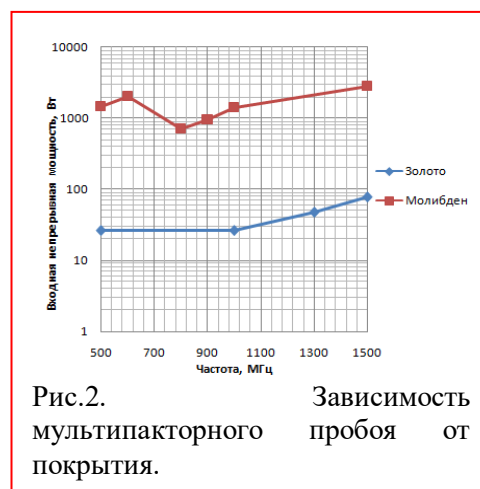


Рис.2. Зависимость мультипакторного пробоя от покрытия.

Литература

[1] AnzaS. Multipactor in Multicarrier Systems. Theory and Prediction. Universitat Politècnica de València. 2014.

Микрополосковая линия для измерения диэлектрической проницаемости пленочных материалов

С.Ю.Молчанов, *И.Ш.Бахтеев

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

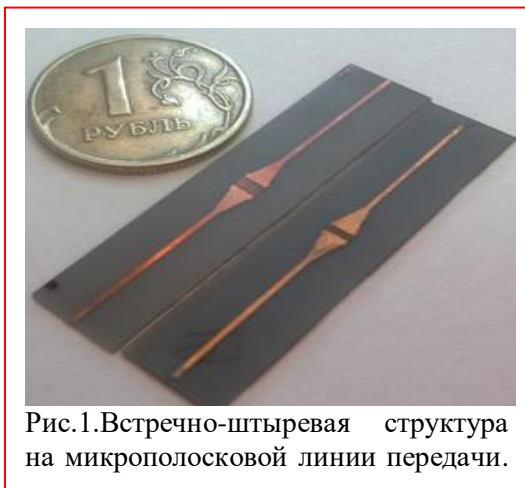


Рис.1. Встречно-штыревая структура на микрополосковой линии передачи.

Исследование диэлектрической проницаемости материалов для радиофизических направлений является актуальной задачей. Существуют основные методы измерения комплексной диэлектрической проницаемости, применяемые в зависимости от частотного диапазона, ожидаемого значения, допустимой погрешности и других характеристик [1]. В последние десятилетия создается всё больше и больше композитных материалов. Их свойства определяются наполнителями (частицами микро- и наноразмеров) и матрицей (связующей). Такие материалы в виде тонких плёнок используются от

СВЧ до оптического диапазона. Актуальным является исследование диэлектрических свойств таких материалов.

Предложенная микрополосковая структура (рис.1) за счёт оптимизации её параметров обладает максимумом электромагнитного поля в области встречных штырей [2]. Изучен СВЧ-отклик данной встречно-штыревой структуры, нагруженной толстоплёночными образцами материалов с различной диэлектрической проницаемостью. Рассмотрено применение встречно-штыревой структуры для определения диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов в СВЧ диапазоне. Изготовленные макеты данной структуры обладали резонансами вблизи рассчитанных значений. Погрешность при измерении диэлектрической проницаемости тестовых образцов со значениями от 2 до 4 составляла не более 5%. С помощью данной изготовленной структуры со встречными штырями были проведены измерения действительной части диэлектрической проницаемости полимерных композитных наноматериалов на основе матриц из полиэтилена низкой плотности и полиметилметакрилата.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] Baker-Jarvis J. R. et al.. NIST Technical note 1536 (2005).

[2] Молчанов С. Ю., Ушаков Н. М., Литвиненко А. Н., Успехи прикладной физики, т. 7, вып. 5, с. 62 (2019).

Спиновый и псевдо-спиновый ферромагнетизм

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

Сильное взаимодействие электронов между собой приводит к возникновению целого букета разнообразных красивых физических явлений, таких как дробный квантовый эффект Холла, Вигнеровская кристаллизация, Стонеровская неустойчивость. Например, взаимодействие между электронами может привести при малой электронной плотности к возникновению макроскопически большой спиновой поляризации, а система переходит в состояние, называемое стонеровским ферромагнетиком. Ненулевое магнитное поле усиливает спиновое расщепление и приводит к проявлению ферромагнетизма уже и при более слабых условиях, а изменение направления и величины поля запускает цепочки ферромагнитных фазовых переходов в режиме квантового эффекта Холла даже вблизи четных состояний электронной системы, которые номинально немагнитны в одночастичном приближении.

В рамках данной работы была изучена эволюция спиновых свойств высококачественных двумерных электронных систем, заключенных в ZnO/MgZnO гетеропереходы, вблизи ферромагнитных фазовых переходов. Анализ интенсивности резонанса позволил установить, что при определенном угле в окрестности фактора заполнения 2 в двумерной электронной системе происходит фазовый переход, сопровождающийся масштабным изменением спиновой поляризации. Непосредственно в области перехода спиновый резонанс значительно уширялся и расщеплялся на несколько независимых пиков. Такое поведение резонанса, по всей видимости, обуславливается расщеплением системы на домены с различной спиновой поляризацией.

В режиме квантового эффекта Холла могут также наблюдаться фазовые переходы, связанные с возникновением и исчезновением макроскопически большой поляризации псевдо-спина. Псевдоспиновая степень свободы возникает в многодолинных двумерных системах, заключенных в широкие AlAs квантовые ямы. При этом величина псевдоспинового расщепления может управляться путем приложения внешнего механического напряжения. В силу особенностей тензора фактора Ланде в AlAs при определенной ориентации магнитного поля спиновые резонансы электронов, заполняющих разные долины, наблюдаются независимо в близких, но принципиально различных магнитных полях. Анализ относительной амплитуды резонансов позволяет непосредственно оценить заполнения каждой из долин и, таким образом, дает уникальные возможности по изучению псевдоспиновых свойств системы.

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

Аномальные магноны в квантово-холловском ферромагнетике при $\nu=2$

А.Б.Ваньков*

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

В двумерных электронных системах на основе гетероструктур MgZnO/ZnO с сильным кулоновским взаимодействием в ферромагнитном квантово-холловском состоянии при факторе заполнения $\nu = 2$ обнаружены аномальные спиновые возбуждения. Методом неупругого рассеяния света обнаружен магнон с отрицательной дисперсией по импульсу, зависящей от параметра электронной концентрации. Аномальная дисперсия с магноторонным минимумом для магнона вызвана его взаимодействием с вышележащими спиновыми возбуждениями при сильном смешивании уровней Ландау. Расчетами методом точной диагонализации подтверждено, что эти возбуждения обладают роторным минимумом, обладают высокой плотностью состояний, целым спином и взаимопритягивающим взаимодействием – им выгодно образовывать устойчивые комплексы.

Обнаружен удивительный факт – анти-Стоксово рассеяние света на аномальных спиновых экситонах оказывается усиленным на многие порядки величины, что свидетельствует о макроскопическом накоплении этих возбуждений в системе. Это явно подтверждается квадратичной зависимостью роста интенсивности рамановских линий от мощности фотовозбуждения.

Определяющим параметром стимулированного анти-Стоксового рассеяния и самого макрозаполненного состояния спиновых экситонов является концентрация двумерных электронов. Выявлено, что при резонансной накачке ансамбля спиновых экситонов наблюдаются дискретные события по вспышке стимулированного анти-Стоксового рассеяния на дополнительные 1-2 порядка величины. Примечательно, что одновременно происходят вспышки стимулированного рассеяния и на удвоенных спиновых экситонах с энергией вблизи $E=2E_z$. Пороговая генерация (гигантское усиление) анти-Стоксовых компонент сигнала с макрозаполненного ансамбля спиновых экситонов и его удвоенной реплики свидетельствует о первых проявлениях когерентного состояния этих квазичастиц.

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

Литература

[1] A. B. Van'kov and I. V. Kukushkin, Phys.Rev. B104, 165144 (2021).

[2] Б. Д. Кайсин, А. Б. Ваньков, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, т.112, вып. 1, с. 62 (2020).

Резонансное отражение света в лафлиновском состоянии 1/3

Е.И.Белозёров,^{1,2*} А.С.Журавлёв¹¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2²НИУ ВШЭ, 101000, Москва, ул. Мясницкая, д.20

*e-mail: eugene@phystech.edu

В представленной работе мы исследуем особенности низкотемпературного ($>0.1\text{K}$) резонансного отражения в AlGaAs/GaAs гетероструктурах и показываем, что основные линии резонансного отражения в дробном состоянии 1/3 соответствуют не одночастичным оптическим переходам, а коллективным переходам с рождением и уничтожением нейтральных возбуждений в электронной системе. Для исследований была использована узкая высококачественная гетероструктура с одиночной квантовой ямой GaAs/AlGaAs, которая помещалась в криостат растворения со сверхпроводящим соленоидом. Оптические измерения проводились в диапазоне температур 0.1–1.5 К и магнитных полей 0–14 Тл с использованием двухсветовой методики. Факторы заполнения электронов в условиях стационарного фотовозбуждения контролировалась с помощью упрощенного варианта методики фотолюминесценции, предложенной для исследования дробных состояний КЭХ [1].

Основным экспериментальным результатом работы является температурная зависимость спектра резонансного отражения света на факторе заполнения 1/3.

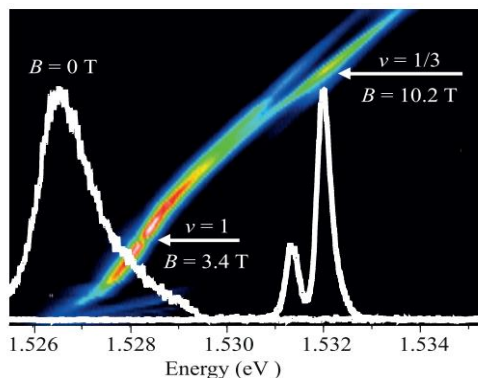


Рис. 1. Динамика спектров нерезонансной фотолюминесценции двумерной электронной системы от магнитного поля в диапазоне магнитных полей 0–12 Тл, измеренная при температуре 0.8 К (амплитуда линий фотолюминесценции показана псевдоцветом). Стрелками указаны факторы заполнения, определенные из спектров фотолюминесценции. Белыми сплошными линиями показаны примеры спектров фотолюминесценции электронной системы при 0 и 10.2 Тл (лафлиновское состояние 1/3).

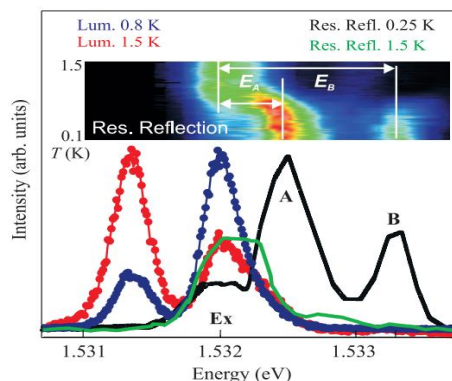


Рис. 2. (Цветной онлайн) Спектры резонансного отражения света (сплошные линии) и нерезонансной фотолюминесценции (точки), измеренные при двух температурах, как указано на рисунке. На вставке показана экспериментальная зависимость спектров резонансного отражения в диапазоне температур 0.1–1.5 К (шкала температур нелинейная). Шкала энергий на вставке соответствует шкале энергий основного рисунка.

Литература

- [1] Л.В. Кулик и др., Письма в ЖЭТФ, т. 112, вып. 8, с. 516 (2020).

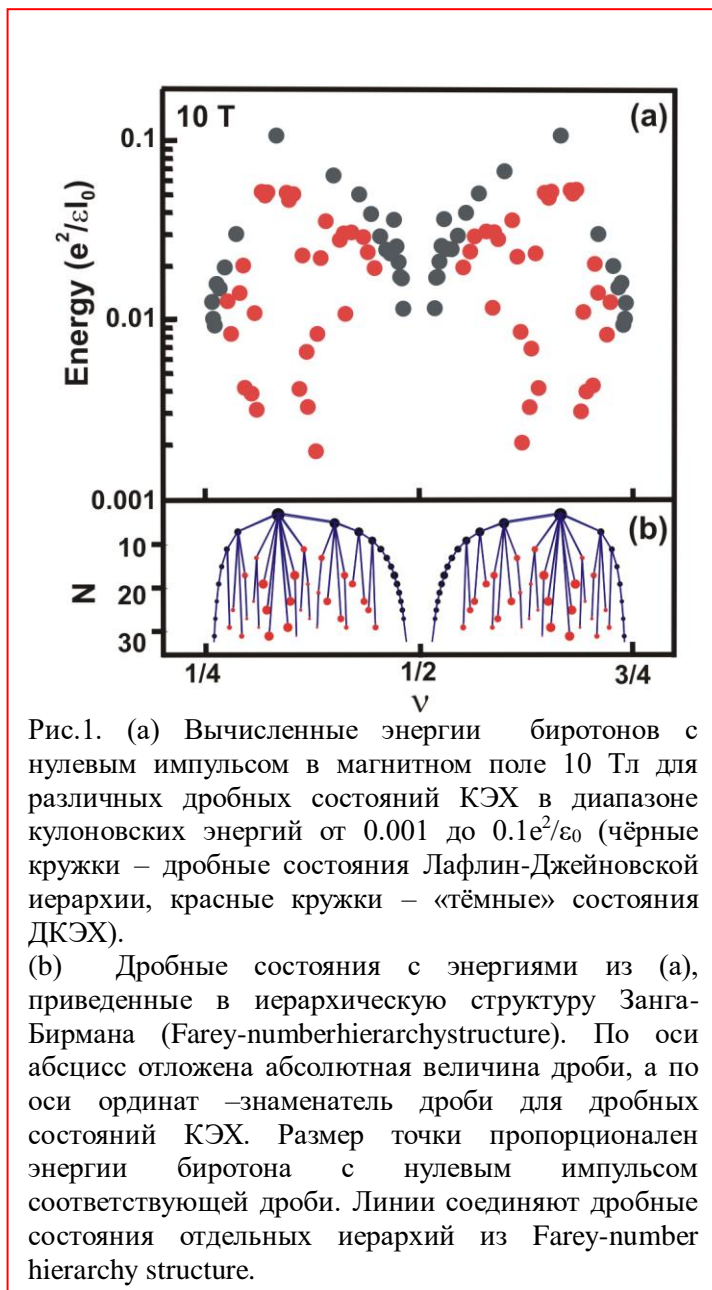
Биротоны и «тёмные иерархии» ДКЭХ

О.А.Григорьев, Л.И.Мусина, А.Б.Ваньков, Л.В.Кулик*

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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



Развита вычислительная схема определения энергий нейтральных возбуждений в дробных состояниях ЭХ, а сами дробные состояния введены в общую иерархическую структуру (Farey-number hierarchy structure). Показано, что помимо широко известной иерархии дробных состояний (аффина-Джейна) существуют также «тёмные» иерархии дробного ЭХ, не наблюдаемые экспериментально в самых неподвижных образцах, но которые оказывают существенное влияние на термодинамику и спектральные характеристики дробных состояний КЭХ. Рассматривается связь «тёмных» иерархий дробного КЭХ с существующими экспериментальными данными. Построена иерархия доступных для вычислений дробных состояний КЭХ в области факторов заполнения электронов от $1/4$ до $3/4$ (рис.1). Энергии дробных состояний хорошо согласуются с иерархической структурой Занга-Бирмана – Farey-number hierarchy structure [1]. Эта иерархическая структура демонстрирует много общего с теоретическими моделями Гальперина, Халдейна и Джейна, но имеет одно весьма существенное отличие. Дробные состояния с сильно

отличающимися по величине знаменателями из различных иерархий этой иерархической структуры могут иметь почти равные энергии, отделяющие основное состояние от возбужденных. Например, энергии таких различных дробных состояний, как $6/19$, $6/17$, $8/23$, $8/25$, $10/29$ и $10/31$, принадлежащих к различным «темным» иерархиям, оказываются примерно равными, так как являются вторыми ступенями от вершины своих иерархических лестниц, начинающихся главным Лафлиновским состоянием $1/3$ (рис.1). В то же время, энергии дробных состояний КЭХ с одинаковыми знаменателями и близкими

факторами заполнений электронов могут значительно отличаться. Например, отношение энергий биротонов в дробных состояниях $10/31$ и $11/31$, являющихся второй и третьей ступенями от вершины своих иерархических лестниц (рис.1), составляет почти два порядка величины.

Несмотря на обилие расчётных дробных состояний КЭХ «тёмных» иерархий их непосредственная ненаблюдаемость в магнитотранспортных экспериментах вполне объяснима. Как видно из построенной в нашей работе иерархической структуры, дробные состояния Лафлин-Джейновской иерархии всегда имеют большую энергию биротонов (которая связана с активационной энергией) по сравнению со всеми близкими к ним по фактору заполнению дробными состояниями «тёмных» иерархий. Поэтому для двумерной электронной системы энергетически более выгодно локализовать, если это возможно, часть возбужденных квазиэлектронов и квазидырок Лафлин-Джейновских дробных состояний и сохранить в области факторов заполнения, разделяющих соседние дробные состояния этой иерархии, неизменным фактор заполнения протяжённых состояний. Учитывая то, что в двумерной электронной системе даже небольшое количество примесей приводит к локализации макроскопического числа электронных состояний, области факторов заполнения, где можно наблюдать дробные состояния «тёмных» иерархий, невелика даже в самых высокоподвижных на сегодняшний день образцах [2]. Обычно эти области при $\nu < 1$ расположены в узких диапазонах факторов заполнения электронов $[1/3; 2/5]$ и $[3/5; 2/3]$, в которых Лафлин-Джейновские дробные состояния отстоят «далеко» друг от друга по фактору заполнения. При приближении фактора заполнения электронов к $1/2$ размер таких областей сокращается, поскольку «расстояние» по фактору заполнения между соседними дробными состояниями Лафлин-Джейновской иерархии сокращается квадратично по знаменателю дроби. Таким образом, Лафлин-Джейновская иерархия дробных состояний КЭХ, не являясь единственной иерархией дробных состояний КЭХ, оказывается, тем не менее, доминирующей (главной) над «тёмными» иерархиями (рис.1). Однако для описания термодинамики и спектральных свойств самих Лафлин-Джейновских дробных состояний учет «тёмных» иерархий становится, по-видимому, необходимым.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] J. Zang, B. Birman, Phys. Rev. B 47, 305 (1993).
 [2] Y. J. Chung, K. A. Villegas Rosales, K. W. Baldwin, P. T. Madathil, K. W. West, M. Shayegan, L. N. Pfeiffer, Nature Materials 20, 632 (2021).

Аномальный спиновый резонанс вблизи четных факторов заполнений в режиме квантового эффекта Холла

А.Р.Хисамеева,^{1*} С.А.Лопатина,² Г.А.Николаев,³ А.В.Щепетильников¹

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

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

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

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

Открытие целочисленного квантового эффекта Холла (ЦКЭХ) [1] оказало огромное влияние на развитие физики полупроводников и привело к созданию совершенно нового направления исследований в физике конденсированного состояния. Спустя несколько десятилетий эта область по-прежнему активно развивается. К одной из основных причин можно отнести то, что данное явление хорошо изучено только в довольно ограниченном случае слабо взаимодействующих электронов. Настоящая работа была направлена на расширение существующих экспериментальных данных путём исследования ЦКЭХ с помощью электронного спинового резонанса в режиме, где электрон-электронное взаимодействие доминирует над любой другой характерной энергией двумерной электронной системы.

Исследования проводились в квантовых ямах AlAs/AlGaAs и гетеропереходах ZnO/MgZnO, которые обладают эффективной массой, в несколько раз тяжелее, чем в стандартных структурах GaAs/AlGaAs [2, 3], и достигает значений более $0.3m_0$, тем самым обеспечивая доминирование кулоновской энергии. Был подробно изучен электронный спиновый резонанс двумерных электронов в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. Удивительным результатом стало наблюдение спинового резонанса вблизи чётных факторов заполнения даже в случае больших плотностей электронов, когда ожидалось, что основное состояние системы является парамагнитным. Более того, амплитуда резонанса была сопоставима между чётными и нечётными факторами заполнения. Такое аномальное поведение свидетельствует о значительной степени спиновой поляризации чётных факторов заполнения и наблюдалось в обеих материальных системах: AlAs-квантовых ямах и гетеропереходах ZnO/MgZnO. В квантовых ямах AlAs спиновый резонанс расщеплялся на две хорошо разрешённые линии вблизи чётных заполнений, в то время как вблизи нечётных оставался только один. Была подробно изучена эволюция спинового резонанса с изменением фактора заполнения. Полученные нетривиальные результаты свидетельствуют о модификации основного состояния вблизи чётных факторов заполнения вследствие сильного электрон-электронного взаимодействия, и могут указывать на возникновение стонеровской неустойчивости.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] K. von Klitzing, Rev. Mod. Phys. 58, 519 (1986).

[2] V. E. Kozlov et al., Phys. Rev. B 91, 085304 (2015).

[3] A. R. Khisameeva et al., Journal of Applied Physics 125, 154501 (2019).

Пространственное распределение плотности двумерных электронов по поверхности образца в нулевом магнитном поле

М.В.Лебедев,^{1,2*} А.Л.Парахонский,¹ В.Е. Бисти,¹ А.А.Дрёмин,¹ И.В.Кукушкин¹

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

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



Рис.1. Области разного контраста в случайном потенциале на ФЛ-изображении поверхности образца, полученные камерой Levenhuk-T310NG (время кадра $t = 2\text{с}$), $B = 0, T \approx 1.7\text{К}$.

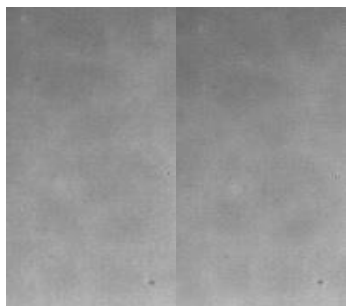


Рис.2. Временная нестабильность (а, б) плотности электронов вблизи E_F (Princeton Instruments CCD, время кадра $t = 20\text{с}$) при $B = 0, T \approx 1.7\text{К}$.

Получено фотолюминесцентное (ФЛ) изображение образца с одиночной GaAs/AlGaAs квантовой ямой (КЯ) при возбуждении лазерным излучением, равномерно освещающим всю поверхность образца. ФЛ-изображение фиксировалось как интегрально по спектру, так и в диапазоне длин волн шириной 5 нм вблизи уровня Ферми (E_F) двумерных (2Д) электронов. При помощи отрезающего и полосового интерференционных светофильтров было получено фильтрованное ФЛ изображение при возбуждении образца широким пятном лазерного излучения при гелиевых температурах ($T \approx 1.7\text{К}$) и в различных магнитных полях. Оказалось, что в нулевом магнитном поле при таких температурах интегральная интенсивность ФЛ не является однородной по поверхности, а демонстрирует области разного контраста с характерным пространственным масштабом от 100 мкм до 1 мм (рис.1). Картина пространственного распределения интегральной интенсивности ФЛ хорошо воспроизводится при неоднократном отогревании исследуемой структуры до комнатной температуры и последующем охлаждении до указанных температур. Она сохраняется длительное время даже при нагревании, по нашим оценкам, до $T \sim 10\text{К}$. Фотолюминесценция за счет подвижных электронов вблизи E_F при $T \approx 1.7\text{К}$ повторяет, в основном, пространственное распределение интегральной интенсивности, однако демонстрирует временную нестабильность (рис.2(а,б)), связанную со спонтанным перераспределением электронной плотности. Вероятно, результаты наблюдения фотолюминесценции демонстрируют макроскопический масштаб случайного потенциала и временную нестабильность распределения плотности 2Д электронов в плоскости квантовой ямы. В КЯ с односторонним легированием δ -слоем доноров в AlGaAs на некотором расстоянии h от края КЯ характерный масштаб пространственной корреляции случайного потенциала в плоскости КЯ ограничен снизу величиной h . К аналогичному эффекту приводит учет конечной ширины 2Д канала, что в сумме дает оценку снизу около 1 мкм, оценка сверху – размер образца.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Наблюдение доменов плотности двумерных электронов в окрестности фактора заполнения $\nu=2$

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

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

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

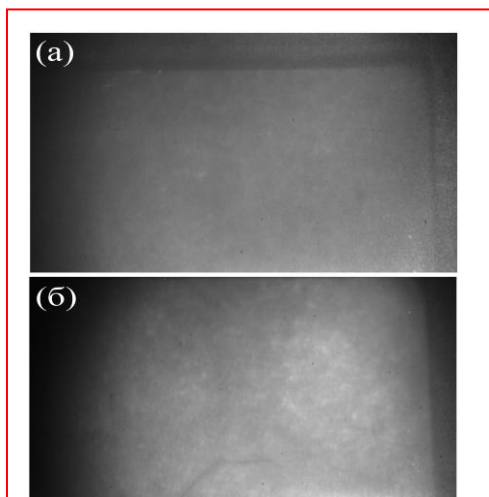


Рис.1. Однородное распределение 2Д электронов с энергиями вблизи E_F при $B \approx 7.8$ Т (а) и разбиение на домены при $B \approx 9$ Т (б); $T \approx 1.7$ К.

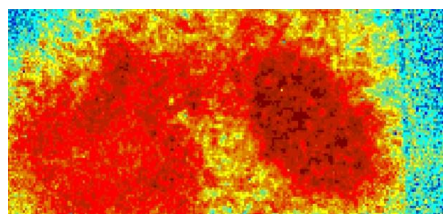


Рис.2. Карта пространственных корреляций интенсивностей в макроскопических доменах с различной концентрацией 2Д электронов.

Методом визуализации пространственного распределения плотности двумерных (2Д) электронов с энергиями вблизи уровня Ферми (E_F) в GaAs/AlGaAs квантовой яме (КЯ) показано существование однородного распределения электронной плотности при факторе заполнения $\nu=2$ и образование доменов электронной плотности при последующем увеличении магнитного поля. Разработанная нами методика регистрации фотолюминесцентного (ФЛ) изображения поверхности образца при возбуждении пространственно однородным излучением лазера [1] позволяет регистрировать распределение плотности 2Д электронов с энергиями вблизи E_F в плоскости КЯ. Измерения, выполненные нами при температурах $T \approx 1.7$ К в магнитных полях $B=7-10$ Т, показали, что при $\nu=2$ в магнитном поле $B \approx 7.8$ Т плотность этих электронов однородна по поверхности кристалла (рис.1а), несмотря на наличие в образце случайного потенциала с пространственным масштабом 100мкм - 1мм. Дальнейшее увеличение B приводит к разбиению однородного распределения на области с различной концентрацией электронов (рис.1б). Мы предполагаем, что внутри макроскопических доменов, хорошо различимых на изображении пространственных корреляций интенсивностей (рис.2), сохраняется фактор заполнения $\nu=2$, тогда как в промежуточных областях $\nu < 2$.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] А.Л. Парахонский, М.В. Лебедев, А.П.Киселев, А.А.Дрёмин, И.В.Кукушкин, сборник тезисов Третьей школы молодых учёных «Новые материалы и технологии для систем безопасности», с. 43. (2021).

Особенности низкотемпературной фотолюминесценции гетероструктур GaN/AlGaN и высокосовершенных объемных кристаллов GaN

В.В.Соловьёв,* Б.Д. Кайсин, И.В.Кукушкин

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

Чрезвычайно обширный фундаментальный и практический интерес к полупроводниковым объектам обусловлен прежде всего возможностью крайне широкого управления их физическими свойствами (электрическими, оптическими) как в процессе создания за счёт выбора методики и архитектуры роста, способа и количества легирования, так и посредством внешнего воздействия в процессе измерений или эксплуатации [1]. Приводятся результаты экспериментальных исследований гетероструктур GaN/AlGaN и высокосовершенных объемных кристаллов GaN методами низкотемпературной фотолюминесценции. Описываются спектральные особенности, ответственные за остаточное легирование кристаллов. Для случая намеренного легирования кристалла GaN углеродом представлены оригинальные результаты по установлению положения примесного уровня с помощью варьирования энергии инфракрасной подсветки, подавляющей интенсивность соответствующей полосы люминесценции.

Для гетероструктур GaN/AlGaN сравниваются спектры магнитофотолюминесценции при существенно отличающихся плотностях двумерных электронов и устанавливаются особенности заполнения подзон размерного квантования [2].

Приводятся первые экспериментальные результаты по обнаружению неожиданных спектральных особенностей, соответствующих двумерным дефектам на интерфейсе раздела между эпитаксиально-выращенным слоем GaN и высокосовершенным объемным кристаллом HVPE-GaN. Данные дефекты являются удивительным случаем гетероструктур из слоев одного и того же материала, в данном случае GaN, кристаллизовавшегося, однако, в двух модификациях кристаллической решётки: вюрцитной и гексагональной.

Работа произведена при частичном финансировании в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] Ю. П., Кардона М., «Основы физики полупроводников»,
«*Human beings and semiconductors are interesting because of their defects*» – фраза,
приписываемая Питеру Ю из U.C.-Berkeley, Физматлит, (2002).
- [2] V.V. Solovyev, S. Schmult, L. Krückeberg et al., Appl. Phys. Lett. 118, 013101 (2021).

Неравновесные процессы в полупроводниковой лазерной структуре при возбуждении прямоугольными электрическими импульсами

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

ИФТТРАН им. Ю.А.

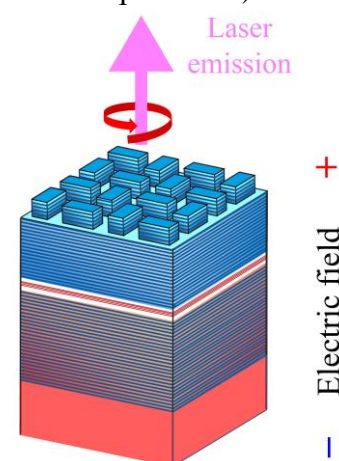
Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

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

Реализация компактных однофотонных и лазерных источников света с контролируемой циркулярной поляризацией излучения была продемонстрирована в последние годы [1,2]. Такие источники являются важными для создания элементной базы в квантовых технологиях передачи и записи информации и оптоэлектроники.

Стимулированное лазерное излучение с высокой степенью циркулярной поляризации ($> 70\%$) исследовалось в хиральных инжекционных полупроводниковых лазерных структурах в виде микростолбиков размером 60×60 мкм² на основе планарных λ -микро-резонаторов с четырьмя GaAs квантовыми ямами внутри и с периодической квадратной решеткой фотонного кристалла хиральной симметрии на верхнем Брэгговском зеркале (см. на рис. схему с 4-мя элементарными ячейками фотонного кристалла).

Возбуждение стимулированного излучения осуществлялось с помощью импульсной электрической накачки различной длительности от 10 нс до 1 мс. При увеличении температуры от гелиевых до ~ 145 К наблюдалась развитая лазерная генерация в виде спектрально очень узких полос с высокой степенью величины циркулярной поляризации излучения, которые испытывали красный сдвиг на величину ~ 6 мЭВ в этом температурном интервале. Наблюдаемый красный сдвиг определяется изменением показателя преломления материала микрорезонатора. При более высоких температурах наблюдалось сверхлинейное возрастание интенсивности и спектральное сужение линии излучения лазерной структуры при возрастании величины импульсного тока, текущего через образец.



При исследованиях с временным разрешением спектров излучения, возбуждаемого длинным прямоугольным электрическим импульсом, наблюдались изменения интенсивности лазерной генерации, которые достигали максимальных значений в различные моменты времени. Был обнаружен также увеличивающийся спектральный красный сдвиг линий с увеличением времени прошедшего от начала импульса. Характерные значения этих сдвигов составляли величины $\sim 50 - 100$ мкЭВ через 1000 нс после начала импульса, увеличиваясь с увеличением температуры до 220 К. Учитывая одинаковую вкладываемую электрическую мощность при измерениях, это не позволяет объяснить наблюдаемое явление простым увеличением температуры в области микрорезонатора из-за тока, протекающего через образец. Была построена модель, которая позволила хорошо описать такие красные сдвиги и определить длины свободного пробега неравновесных фононов при изменении температуры.

Работа частично поддержана проектом РФФИ № 20-02-00534.

Литература

[1] А.А. Максимов, Е.В. Филатов, И.И. Тартаковский, Известия РАН. Серия физическая 85, № 2, 241–244 (2021); 86, № 4, 494–498 (2022).

- [2] A.A. Maksimov *et al.*, Phys. Rev. Applied 17, L021001 (2022).

Новая схема безэталонной квантовой фотометрии

С.Ю.Цовьянов,^{1*} В.В.Землянов,¹ М.В.Лебедев,^{1,2} О.В.Мисочко,^{1,2} А.В.Соловьёв¹ и Г.Б.Лесовик¹

¹МФТИ (НИУ), 141701, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д.9.
²ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

*e-mail: enragemail@mail.ru

В работе представлена новая схема для калибровки однофотонных детекторов без использования эталона. Метод безэталонной калибровки основан на эффекте спонтанного параметрического рассеяния света, когда фотон накачки распадается на два фотона – сигнальный и холостой. В процессе рассеяния удовлетворяются законы сохранения энергии и импульса, приводящие к необходимому выполнению условий частотного и пространственного синхронизма:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i.$$

Здесь \mathbf{k} – волновой вектор, а ω – частота волны. Индекс 'p' относится к моде накачки, а индексы 's' и 'i' относятся, соответственно, к сигнальной и холостой модам. В старых схемах использовался неколлинеарный случай, но новый метод основан на коллинеарном синхронизме 1-го типа, когда $\omega_i = \omega_s$.

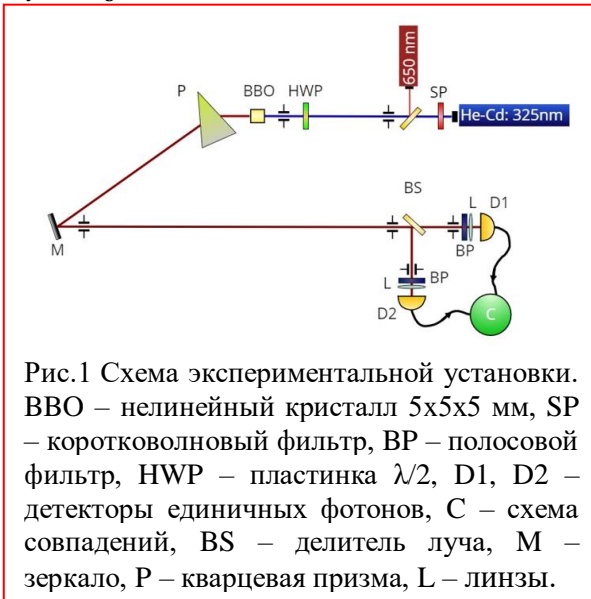


Рис.1 Схема экспериментальной установки. BBO – нелинейный кристалл 5x5x5 мм, SP – коротковолновый фильтр, BP – полосовой фильтр, HWP – пластинка $\lambda/2$, D1, D2 – детекторы единичных фотонов, C – схема совпадений, BS – делитель луча, M – зеркало, P – кварцевая призма, L – линзы.

После прохождения через кристалл (рис.1) фотоны накачки отклоняются с помощью призмы, а поток бифотонов с помощью зеркала направляется на делитель. При прохождении делителя фотоны из пары могут: пройти делитель в одном направлении или пройти в разных. Количество отсчетов N_1 и N_2 на каждом детекторе, а также количество совпадений N_c , определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} N_1 &= \alpha_1 \eta_1 T (2 - \alpha_1 \eta_1 T) M, \\ N_2 &= \alpha_2 \eta_2 R (2 - \alpha_2 \eta_2 R) M, \\ N_c &= 2(\alpha_1 \eta_1 T \alpha_2 \eta_2 R) M. \end{aligned}$$

Здесь α_1, α_2 – коэффициенты пропускания оптических каналов, η_1, η_2 – квантовая эффективность, T и R – коэффициенты пропускания и отражения делителя, M – общее

количество пар фотонов.

Из этой системы можно получить выражения для квантовой эффективности детекторов:

$$\eta_1 = \frac{2(2n_1 - 1)}{\alpha_1 T (4n_1 n_2 - 1)}, \eta_2 = \frac{2(2n_2 - 1)}{\alpha_2 R (4n_1 n_2 - 1)}, n_i = \frac{N_i}{N_c}, i = 1, 2.$$

Основные преимущества нашей схемы – это относительная простота реализации и хорошо воспроизводимая геометрия эксперимента.

Литература

- [1] Клышко Д.Н., Пенин А.Н., УФН, том 152, с. 653 (1987).
 [2] A. L. Migdall, R. U. Datla, A. Sergienko, J. S. Orszak and Y. H. Shih, *Metrologia* 32(6), p. 479 (2003).

Использование резонансов Фабри-Перо метаструктуры-подложки при наблюдении поверхностно-усиленного рамановского рассеяния света

**Д.А.Громько,^{1*} С.А.Дьяков,¹ Н.А.Гиппиус,¹ С.Г.Тиходеев,^{2,3} А.С.Астраханцева,^{4,5}
Я.В.Федотова,⁴ В.В.Соловьёв,⁴ И.В.Кукушкин⁴**

¹Сколковский институт науки и технологий, 121205, Москва, Большой бул., 30, стр. 1

²ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

³МГУ им. М.В.Ломоносова, 119234, Москва, ул. Колмогорова, 1, стр. 2

⁴ИФТТ РАН им. Ю. А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

⁵МФТИ (НИУ), 141701, Долгопрудный, Московская область, Институтский пер., 9

*e-mail: Dmitrii.Gromyko@skoltech.ru

Теоретически исследована зависимость усиления интенсивности рамановского рассеяния света на органических молекулах от высоты периодической структуры металл-диэлектрик, выполняющей функцию подложки. Обнаружены осцилляции интенсивности комбинационного рассеяния света в зависимости от высоты структуры. Полученные зависимости интенсивности согласуются с экспериментальными данными [1]. Показано, что эти осцилляции явно связаны с эффектом Фабри-Перо. Показано, что интенсивность поверхностно-усиленного рамановского рассеяния может быть дополнительно увеличена за счет усиления локального поля (на порядок) как на частотах накачки, так и стоксовой, а также антистоксовой частотах за счёт делокализованных резонансов. Эти резонансы соответствуют модам поверхностных плазмон-поляритонов на верхней и нижней металлических частях структуры, связанных между собой через вертикальные моды Фабри-Перо в промежуточном диэлектрическом слое [2]. Предложена полуаналитическая одномодовая модель для качественного описания эффекта. Показано значительное отклонение дисперсии связанных через моды Фабри-Перо плазмон-поляритонов от классической модели дисперсии поверхностных плазмон-поляритонов, свёрнутых в первую зону Бриллюэна.

Литература

[1] В.И. Кукушкин, В.Е. Кирпичёв, Е.Н. Морозова, В.В. Соловьёв, Я.В. Федотова, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, 112, 1 (2020).

[2] T.Weiss, et al., Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications 9, 390 (2011).

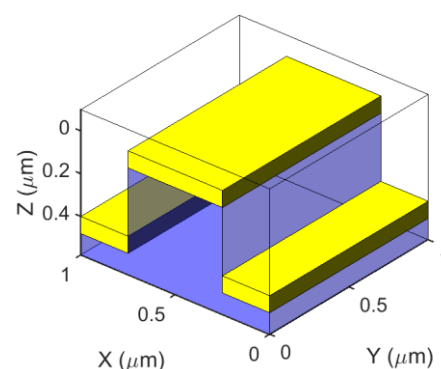


Рис.1. Схематичное изображение элементарной ячейки исследуемой структуры. Жёлтым изображено серебро, прозрачным синим – кварц.

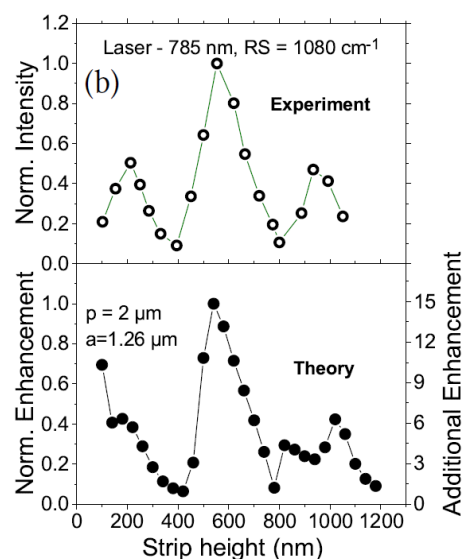


Рис.2. Сравнение экспериментально измеренного и теоретически

Влияние дефектов интерфейсов на фотолюминесценцию инкапсулированных слоев дихалькогенидов переходных металлов

А.С. Бричкин,¹ Г.М.Голышков,^{1,2} А.В.Черненко^{1*}

¹ИФТТРАН им. Ю. А.

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

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

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

Качество гетероструктур на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), критически важное для оптических исследований, определяется неоднородным уширением линий фотолюминесценции (ФЛ) нейтральных и заряженных экситонов. Времена жизни экситонов в таких структурах лежат в диапазоне 1-10 пс, и это означает, что однородная ширина линии менее 1 мэВ, ширина линий (FWHM) ФЛ монослоев WSe₂ и MoSe₂ в атмосфере составляет 15-30 мэВ из-за абсорбции влаги и кислорода. Для того чтобы избежать деградации монослоев и уширения линий, моно- и гетерослои инкапсулируются, то есть помещаются между слоями гексагонального нитрида бора (hBN).

Ширина линий ФЛ инкапсулированных слоев при гелиевых температурах лежит в диапазоне 2-7 эВ и зависит от толщины нижнего инкапсулирующего слоя hBN. Неоднородное уширение линий ФЛ инкапсулированных слоев вызвано флуктуациями случайного потенциала, связанного с пузырями на интерфейсах и дефектами самих слоев. Ранее было установлено, что увеличение толщины нижнего слоя hBN более 100 нм, приводит к сужению линий ФЛ. Объяснение зависимости ширины линий ФЛ от толщины слоя hBN за счет эффекта Парселла было предложено в работе [1], но измерения не подтвердили эту гипотезу. Тем не менее, оказалось, что можно добиться уменьшения ширины линии ФЛ вплоть до 1.8 мэВ.

Измерения ФЛ, проведенные при гелиевых температурах, показали, что уменьшение диаметра пятна лазерного возбуждения ($\lambda=532$ нм) с 6 до 2 мкм приводит к сужению линий ФЛ, а в спектре начинают разрешаться линии, которые не были разрешимы ранее. Однако даже при минимальном размере пятна возбуждения некоторые линии остаются неразрешимыми, что приводит к появлению «плеч» как с высокоэнергетической, так и с низкоэнергетической стороны от линий ФЛ экситонов и трионов и флуктуациям положений и ширины линий.

Сканирующая электронная микроскопия позволила объяснить такое поведение линий. Оказалось, что инкапсулированные слои ДПМ имеют неоднородную латеральную структуру с характерным размером неоднородностей порядка 0.6 мкм. Электронная микрография слоев hBN и ДПМ на подложке показывает отсутствие неоднородностей такого крупного масштаба. Это позволяет связать неоднородности с пузырями на интерфейсах ДПМ-hBN, которые приводят к вариациям положения и ширины линий.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] H.H. Fangetal., PRL 123, 067401 (2019).

Штарковский сдвиг линий фотолюминесценции экситонов в гетероструктурах с монослоями MoSe_2

Г.М.Голышков,^{1*} А.С.Бричкин,² А.В.Черненко²

¹МФТИ (НИУ), 141701, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д.9

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

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

Гетероструктуры на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) привлекают значительный интерес как перспективные объекты для применения в оптоэлектронике. Они также представляют интерес для исследования свойств нейтральных и заряженных двумерных экситонов, образованных электронами и дырками в монослоях ДПМ [1].

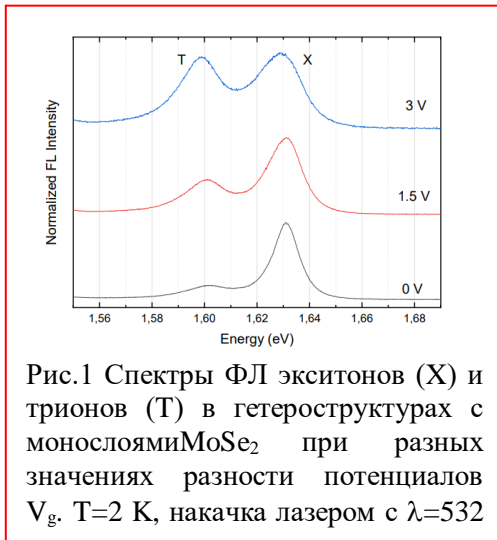


Рис.1 Спектры ФЛ экситонов (X) и трионов (Т) в гетероструктурах с монослоями MoSe_2 при разных значениях разности потенциалов V_g . $T=2$ К, накачка лазером с $\lambda=532$

Приложение электрического поля является важнейшим инструментом, позволяющим изменять энергетические уровни и плотности носителей заряда и экситонов в полупроводниковых структурах. Приложение вертикального электрического поля перпендикулярного монослоям ДПМ позволяет воздействовать на основные и возбуждённые состояния экситонов, модифицировать их спектры фотолюминесценции (ФЛ) благодаря штарковскому сдвигу линий.

Для наблюдения эффекта Штарка методом механической эксфолиации были приготовлены образцы, в которых монослои MoSe_2 инкапсулировались слоями гексагонального нитрида бора hBN . Инкапсулированные монослои, в свою очередь, помещались между нижним слоем графита и верхним слоем графена, выполняющими роль обкладок конденсатора, к которым приложена внешняя разность потенциалов V_g . Линии ФЛ экситона (X) и отрицательно заряженного триона (Т) хорошо разрешаются в спектре ФЛ, как это показано на рис.1.

При создании разности потенциалов между нижним и верхним графеновыми слоями наблюдается значительный штарковский сдвиг линий экситонов (X) и трионов (Т), который превышает -20 мэВ при разности потенциалов $V_g=6$ В. Штарковский сдвиг линий экситона и триона хорошо описывается квадратичной зависимостью смещения от электрического поля. При измерении ФЛ наблюдается эффект запаздывания, связанный с медленным перераспределением заряда в слоях графена.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] A. Kolobov, Junji Tominaga, Springer, pp. 538 (2016).

Манипулирование электрон-фононным взаимодействием в GaAsp-типа и SnSe посредством аттосекундного оптического контроля

О.В.Мисочко,^{1,2*}М.В.Лебедев^{1,2}

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

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

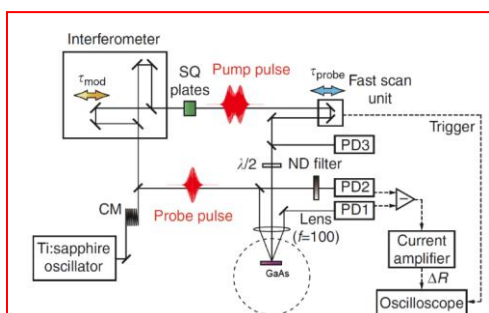


Рис. 1 Схематичное представление экспериментальной установки.

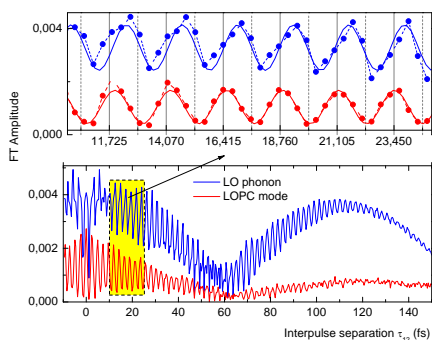


Рис. 2. Интерферограммы LO фоннных и смешанных фонн-плазмонных мод в GaAs.

Сверхкороткие лазерные импульсы позволяют генерировать и детектировать различные когерентные элементарные возбуждения в твёрдом теле с помощью метода накачки-зондирования. Такие сверхкороткие импульсы позволяют возбуждать фононы и электроны в течение времени, меньшего, чем типичный цикл колебаний решётки и фотогенерируемой плазмы. Квантово-кинетические исследования предсказывают, что в этом крайне неравновесном режиме смешанные фонн-плазмонные моды в полярном полупроводнике не устанавливаются мгновенно. Тем не менее оставался вопрос, возможно ли и как обратить вспять или хотя бы изменить накопление квантовых корреляций после того, как оно уже началось? Или другими словами: можно ли контролировать процесс взаимодействия, который стал бы необратимым, если бы система была предоставлена самой себе? Наше исследование даёт утвердительный ответ путём наблюдения за усилением и подавлением электрон-фононного взаимодействия в полупроводнике GaAs и пайерлсовском диэлектрике SnSe, демонстрируя, что взаимодействие представляет собой интерференцию с конечной длительностью. В результате, взаимодействие может быть обращено во времени (и тем самым, уменьшено) или усилено во время деструктивной

или конструктивной интерференции соответственно посредством возмущения, фаза которого выбрана надлежащим образом. Мы подробно изучили электронную и решёточную когерентность в GaAsp-типа и SnSe и реализовали полное подавление смешанной фонн-плазмонной моды в GaAs и пайерлсовской моды в SnSe парой перекрывающихся во времени синхронизированных лазерных импульсов, регулируя межимпульсное разделение с аттосекундной точностью.

Работа поддержана РФФИ (грант 20-02-00231).

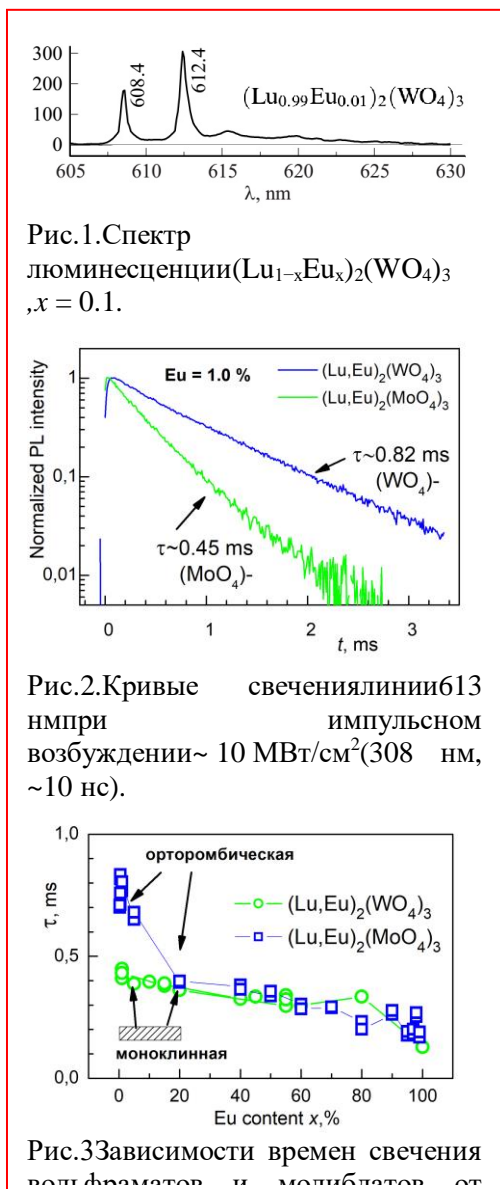
Кинетика свечения ионов Eu^{3+} в вольфраматах $(\text{Lu}_{1-x}\text{Eu}_x)_2(\text{WO}_4)_3$ и молибдатах $(\text{Lu}_{1-x}\text{Eu}_x)_2(\text{MoO}_4)_3$

С.В.Зайцев*

ИФТТРАН им. Ю. А.

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

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



Eu^{3+} [1] и, соответственно, к наблюдаемой разнице времен свечения τ в вольфраматах и молибдатах.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] С.З. Шмурак, В.В. Кедров, А.П. Киселев и др., ФТТ 61, 2142 (2019).

Первый в мире портативный рамановский экспресс-анализатор цветных уличных наркотиков, способный обнаруживать метамфетамин в *Ябе* и устанавливать концентрации метамфетамина и кофеина

Э.Степанец-Хуссейн,^{1,2*}

А.Б.Ваньков,^{1,2}DulalKrishnaSaha,³MdShafiqulIslamSarker,³MdAbuHasan³

¹EnhancedSpectrometry, Inc, SanJose, CA 95110, USA

²ИФТТРАН им. Ю. А.

Осипьяна,142432,Черноголовка,Московскаяобл.,ул.АкадемикаОсипьяна, д. 2

³Department of Narcotics Control, 174 Distillery Road, Dhaka, 1204, Bangladesh

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

На сегодняшний день одной из самых острых проблем в Южной и Юго-Восточной Азии является широкое распространение дешёвых уличных наркотиков, представляющих собой всегда смеси из наполнителей и наркотических веществ в низких концентрациях. Как правило, содержание действующего наркотика составляет несколько процентов от общей массы образца. Самым дешёвым, самым массовым и самым трудно детектируемым современными аналитическими методами уличным наркотиком является *Яба* (*Yaba*—от тайского наркотик *безумия*) [1]. *Яба* производится в форме таблеток красного, оранжевого или розового цвета и состоит из двух основных компонентов: кофеин и метамфетамин – доля последнего не достигает 20%. Стоимость такой таблетки не превышает пяти долларов США, а ежегодный трафик из Мьянмы в соседние страны превышает десять миллиардов таблеток ежегодно [2,3]. Целью правоохранительных органов, в частности Департаментов по борьбе с наркотиками таких стран, как Бангладеш, Таиланд, Вьетнам, Индонезия, Малайзия, Филиппины является пресечение распространения и оперативное изъятие таблеток *Яба* из оборота. Для решения этой цели на передний план выходит задача по экспресс-идентификации *Ябы* посредством надёжных аналитических приборов, способных выявлять наркотические соединения при низких концентрациях, в режиме полевых условий и в жарком климате.

В современном мире единственным надёжным экспресс-методом идентификации каких бы то ни было наркотических соединений является рамановская спектроскопия, которая, ко всему прочему, не требует предварительной подготовки образца и работы с химическими реактивами. При этом, очевидно, есть всего два необходимых условия, обеспечивающих саму возможность идентификации наркотической субстанции: а) нужно получить, то есть измерить рамановский спектр – набор характеристических пиков, индивидуальных для каждого вещества во Вселенной; б) нужно иметь эталонный спектр в базе данных. Эталонные рамановские спектры как кофеина (белый порошок при нормальных условиях), так и метамфетамина (прозрачные кристаллы при нормальных условиях) известны давно, а потому в чистом виде легко и быстро идентифицируется при помощи современных портативных рамановских анализаторов. Однако, до нашей работы в мире не существовало рамановских анализаторов, способных идентифицировать метамфетамин в *Ябе* (портативные спектрометры Bruker, SmithsDetection, ThermoFisher, Metrohm, Anton-Paar, V&WТеки др.), ибо с таблетками *Ябы* задача существенно усложняется: во-первых, данные образцы сильно люминесцируют в видимом и ближнем ИК диапазоне, вплоть до 1000 нм, при фотовозбуждении наиболее популярными сегодня лазерными источниками на длинах волн 532 нм, 633 нм, 785 нм (фотолюминесценция отсутствует только при накачке на длинах волн выше 1 мкм, например, если использовать твёрдотельный лазер 1064 нм); а во-вторых, в спектральной области, где люминесценция

не поджигается, современным портативным ИК-рамановским спектрометрам не хватает чувствительности, чтобы накопить спектр с присутствием слабых по интенсивности рамановских линий метамфетамина помимо интенсивных линий кофеина. Кроме того, в том случае, когда при помощи портативного рамановского анализатора удавалось измерить спектр с наличием как пиков кофеина, так и пиков метамфетамина (только прибор RigakuResq), алгоритмы распознавания, встроенные в программно-аналитический комплекс устройства (HQI and p-Value Wavelets-based, patent pending, for RMID and mixtures), не справлялись с идентификацией в смеси метамфетамина, находящегося в малых количествах в исследуемых таблетках.

Нам удалось создать мобильный рамановский спектрометр с габаритами, 180 мм X 130 мм X 60 мм, достигнув при диапазоне 200 – 1900 см⁻¹ спектральное разрешение в 7 – 9 см⁻¹, тогда как полная ширина на половине высоты характерных рамановских линий метамфетамина и кофеина превышает 8 см⁻¹ в нормальных условиях. Высокое спектральное разрешение особенно важно при идентификации компонентов гомогенных смесей органических веществ, как в нашем случае. Основа нашего рамановского спектрометра – твёрдотельный лазер с длиной волны 1064 нм и выходящей мощностью до 500 мВт, который не возбуждает фотолюминесценцию как в таблетках *Ябы*, так и во всех других уличных наркотиках (таблетки MDMA, героин в смесях). Спектрометр оснащён InGaAsTE-охлаждаемой ПЗС-линейкой, смонтированной на системе медных охладителей специальной формы с выводом наружу корпуса спектрометра – последнее особенно актуально при эксплуатации в регионах с высокой температурой окружающей среды (более 35⁰ Цельсия). Отдельная работа была проведена в рамках алгоритма распознавания составного спектра, содержащего пики разных веществ. Для нас было важно, чтобы наличие метамфетамина в спектрах *Ябы* надёжно подтверждалось без ложноположительных и ложноотрицательных заключений, учитывая огромное количество (порядка 20 тысяч) эталонных рамановских спектров в исходной базе данных. Как нами было найдено, оптимальными параметрами являются диапазон поиска пиков вещества-наполнителя 200-1900 см⁻¹ (после чего из исходного спектра вычитались пики распознанного спектра), диапазон поиска пиков смеси 759 – 1850 см⁻¹, минимальное соотношение сигнал-шум для идентификации пиков 1,1. Кроме того, в базе данных специальным образом был обработан эталонный спектр метамфетамина: был выделен участок 759 – 1139 см⁻¹, суть полоса, где линии метамфетамина преобладают над линиями кофеина, но при этом были удалены пики метамфетамина в спектральных позициях 888 см⁻¹, 986 см⁻¹, 1059 см⁻¹. Испытание нашей системы на семистах различных таблетках *Ябы* продемонстрировала воспроизводимость и точность найденного алгоритма. Помимо всего прочего, измерив образец *Ябы* с известной концентрацией компонентов смеси нами был внедрён количественный анализ на шаге, следующем за идентификацией исходных компонентов. Таким образом, в течение одной минуты помимо идентификации веществ прибор выдаёт данного о процентном содержании кофеина и метамфетамина с точностью не хуже 0,5%.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] <https://www.unodc.org/unodc/en/frontpage/yaba-the-crazy-medicine-of-east-asia.html>
- [2] <https://pulitzercenter.org/stories/yaba-red-pills-and-rohingya>
- [3] <https://www.bbc.co.uk/news/stories-48041414>

Прорыв в оптическом приборостроении: компактный рамановский поляриметр

Э.Степанец-Хуссейн,^{1,2*} В.Е.Кирпичёв,^{1,2} L.Nagli,³ M.Pearl⁴

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

²*ИФТТРАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул.*

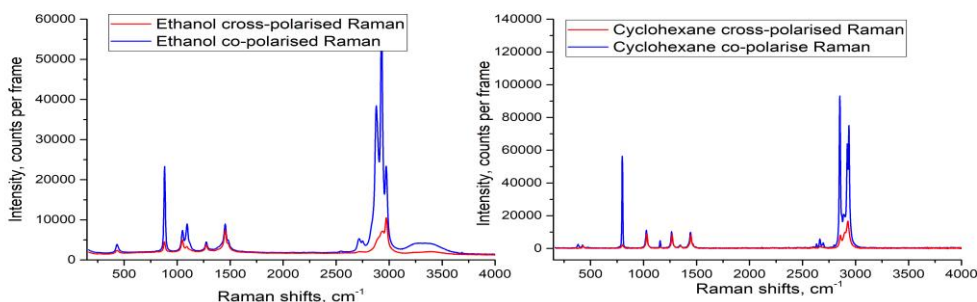
Академика Осипьяна, д. 2

³*Department of Physics, Ariel University, Ariel 40700, Israel*

⁴*WISE-TECH Ltd., Rosh Ha'ayin 4809234, Israel*

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

Существующие сегодня портативные рамановские спектрометры не регистрируют поляризационно-разрешённые спектры неупругого рассеяния света. Рамановская поляриметрия доступна в качестве опции в весьма ограниченном наборе конфокальных рамановских микроскопов, предназначенных для лабораторных, а не для полевых исследований. Однако в ряде задач чувствительность неупругого рассеяния света к поляризации выходит на передний план, поскольку может предоставить подробную информацию об ориентации молекул в монокристаллах и анизотропных материалах, о симметрии активных в рамановском рассеянии мод [1]. Нам удалось миниатюризировать поляриметрическую схему и встроить её в компактный рамановский спектрометр на базе прибора *EnSpectrR532*: так, площадь оптической плиты, на которой были размещены спектрометр типа Черни-Тернера вместе с ПЗС-матрицей, лазер, система фильтров, набор линз для накачки и сбора сигнала, анализатор проходящего света, система поляризаторов для падающего на образец излучения, электро-механический блок управления поляризаторами, не превышала 90 мм на 120 мм, при этом такие габариты необходимы и достаточны для получения поляризационно-разрешённых рамановских спектров во всём диапазоне колебаний в твёрдых и жидких веществах с разрешением лучшим, чем полуширина линий жидкостей в нормальных условиях. Поскольку используемые лазеры (длина волны 532 нм, мощность до 50 мВт) поляризованы линейно в соотношении 15:1, первый поляризатор располагался сразу же после лазерного фильтра для увеличения степени поляризации фотовозбуждения до 1000:1. В след за данным поляризатором находилась пластина, прикреплённая к оси сервопривода весом в 8 граммов с рабочим напряжением 5 Вольт (напряжение подавалось от контроллера спектрометра) и с максимальным крутящим моментом 1.5 кгс-см. К данной, вращающейся на оси, пластине, в свою очередь, монтировались два ортогональных друг другу поляризатора, позволяющих тем самым проводить измерения рамановских спектров в ко- и в кросс-поляризациях относительно анализатора, располагавшегося на входе в спектрометр. Анализатор приклеивался на входную щель спектрометра, размером 20 мкм. В программно-аппаратный комплекс была добавлена функция вращения поляризаторов с шагом в 1 градус, а также были заданы реперные точки, соответствующие ко- и кросс-ориентациям поляризатора лазера. На рисунке ниже представлены характерные спектры нашего прибора.



Литература

[1] Banwell C. N. et al., *Fundamentals of molecular spectroscopy*, McGraw-Hill (1994).

Исследование адсорбции катионных раман-активных красителей на серебряные наночастицы. Синтез многослойных наночастиц Ag-Au с включённым между слоями металлов раман-активным красителем

Д.А.Грибанёв,^{1*} В.И.Кукушкин,¹ Е.Г.Завьялова²

¹ ИФТТРАН им. Ю. А.

Осипьяна, 142432, Черногоровка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2

² МГУ им. М. В. Ломоносова, Химический факультет, 119991, Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 3

*e-mail: digrib@gmail.com

Ранее мы изучали взаимодействие наночастиц или nanoостровков на подложках, функционализированных распознающими элементами (аптамерами) с биологическими объектами, мечеными аптамерами с SERS-активным красителем. Такая схема исследований имеет множество преимуществ, включая простоту исполнения, доступность реагентов, однако оптические сигналы в таких системах сильно подвержены влиянию состава среды [1].

В данной работе мы приступили к получению наночастиц, являющимися одновременно и распознающим элементом, и SERS-меткой. В качестве основы для получения такого типа субстратов нами был выбран синтез многослойных наночастиц Ag@Au с включённым между слоями металлов раман-активным красителем, описанным в исследовании [2].

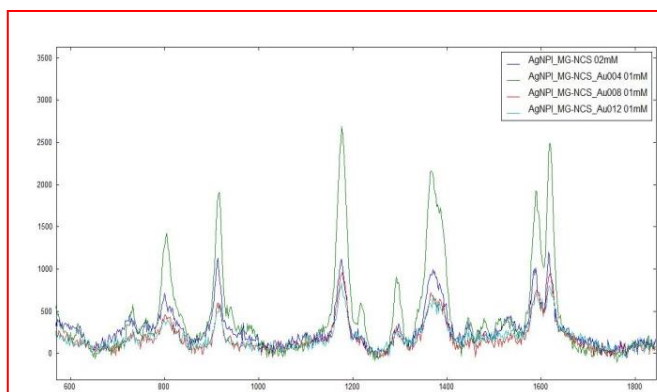


Рис.1.Изменение SERS-спектра красителяMG-NCSв зависимости от толщины слояАуна цитрат-стабилизированных Агнанопластинах.

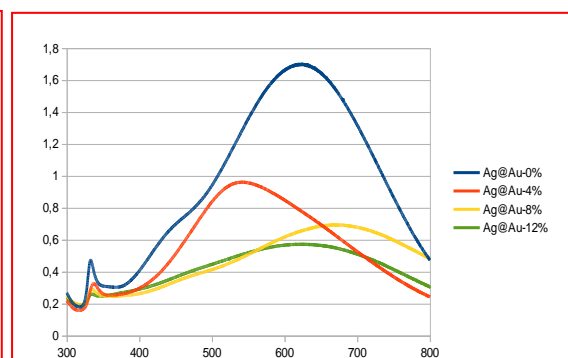


Рис.2.Изменение UV-visспектров цитрат-стабилизированных Агнанопластин с адсорбированным MG-NCSв зависимости от толщины слоя Au.

На первом этапе нашей работы изучалась адсорбция катионных раман-активных красителей на цитрат-стабилизированные серебряные наночастицы разной степени сплюснутости. Было выявлено, в частности, значительное влияние противоиона красителя на силу его сигнала. На втором этапе работы полученные серебряные наночастицы с адсорбированным красителем покрывались «защитным» слоем золота различной толщины. В ходе исследования неожиданно было обнаружено значительное усиление SERS сигнала на сплюснутых наночастицах с тонким слоем золота.

Такого типа наночастицы, несмотря на определённые сложности в получении, обладают заметным преимуществом перед обычными серебряными зольями благодаря устойчивости SERS-сигнала к составу исследуемой смеси. Также наночастицы с включённым красителем обладают широкой возможностью для функционализации внешней поверхности. Слой золота поверх серебра делает эти наночастицы не цитотоксичными, что является преимуществом для исследований *in vivo*.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-72-30003.

Литература

- [1] Zavyalova E.G. et al., International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), IEEE (2021).
 [2] Guo Xi et al., Microchimica Acta, 178.1, pp. 229 (2012).

SEL-аптасенсоры на основе трековых мембран для определения вируса гриппа А

Е.Г.Завьялова,^{1*} В.И.Кукушкин,² О.В.Кривавчук,³ А.Н.Нечаев³

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

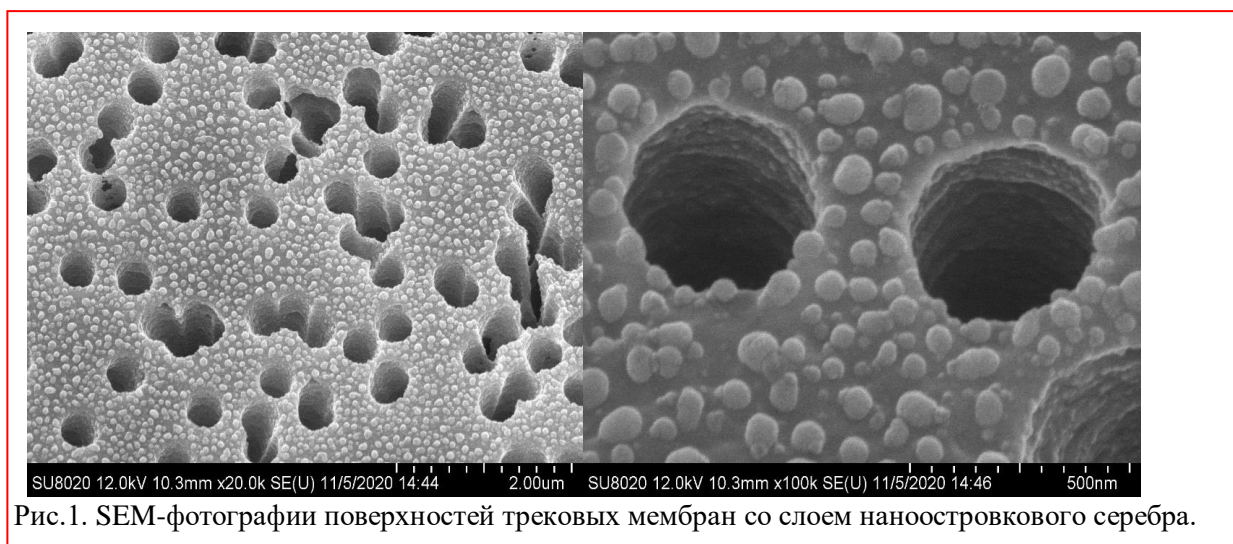
²ИФТТ РАН им. Ю. А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

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

*e-mail: zlenka2006@gmail.com

Для специфичного определения вируса гриппа А штамма H7N1 трековые мембраны из полиэтилентерефталата (рис. 1) со средним диаметром пор около 200 нм с помощью метода вакуумного термического напыления были покрыты слоем наноостровкового серебра с номинальной толщиной 10 нм (проводился термический отжиг при температуре 120 °С в течение 5 минут) и функционализированы тиомодифицированным ДНК-аптамером, узнающим поверхностный белок вируса гриппа (гемагглютинин). Через данную мембрану фильтровали образец вируса гриппа с добавлением ДНК-аптамера идентичной структуры, но меченного цианиновым красителем Су3. В образцах с вирусом гриппа наблюдали 5-кратное усиление флуоресценции Су3 за счёт эффекта поверхностного усиления флуоресценции (SEL) при образовании тройного комплекса: ДНК-аптамер, иммобилизованный на поверхности серебряных наночастиц; вирус гриппа; ДНК-аптамер, меченный Су3.

Разработанные мембраны с наноостровковым слоем серебра могут быть использованы для определения вируса гриппа А.



Предложенный сенсор интересен возможностью концентрирования аналита из большого объема образца. Данные сенсоры позволяют отфильтровать низкомолекулярные соединения, соли и белки, содержащиеся в исследуемых биологических пробах, и появляется возможность создавать на их основе аптасенсоры для определения различных вирусов.

Работа выполнена за счёт гранта РНФ (№ 18-74-10019).

Поляризационная динамика спинорных микрорезонаторных экситонных поляритонов в туннельно-связанных двойных ловушках в условиях импульсной резонансной накачки

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

¹ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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

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

Взаимодействие спиновых компонент экситонных поляритонов в микрорезонаторах в условиях резонансной оптической накачки проявляется в ряде интереснейших эффектов, часть которых подтверждена экспериментально (эффект мультистабильности), а часть только теоретически обоснована [1]. Целью настоящей работы было изучение влияния спинорности поляритонов на их спектр и динамику в туннельно-связанных двойных ловушках (ТДЛ).

Для резонансного возбуждения поляритонов в ТДЛ использовались 2-пс лазерные импульсы ($\Delta E \approx 1.2$ мэВ $\gg 2 * J \approx 0.1$ мэВ) с контролем поляризации. Показано, что при взаимодействии спиновых компонент снимается вырождение уровней ТДЛ, возникают 4 линейно-поляризованных состояния поляритона (рис.1). Это отражается в динамике заполнения ям в ТДЛ (рис.1). Теперь при π_x -поляризованной накачке и детектировании π_x и π_y поляризаций наблюдаются три временных периода: наименьший T_1 отвечает за расщепление π_x -поляризованных состояний ($\Delta \epsilon \approx 2 * J_1, T_1 \approx 45$ пс), период T_D соответствует расщеплению π_x - и π_y -уровней ($\Delta \epsilon \approx 2 * D, T_D \approx 90$ пс) и биения с T_{12} отвечают разнице расщеплений π_x - и π_y -поляризованных состояний ($\Delta \epsilon \approx 2 * (J_1 - J_2), T_{12} \approx 350$ пс). Расчет хорошо согласуется с измерениями. Таким образом, спинорная поляритонная ТДЛ формирует локальную микросистему с богатой поляризационной динамикой и долговременными когерентными осцилляциями.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

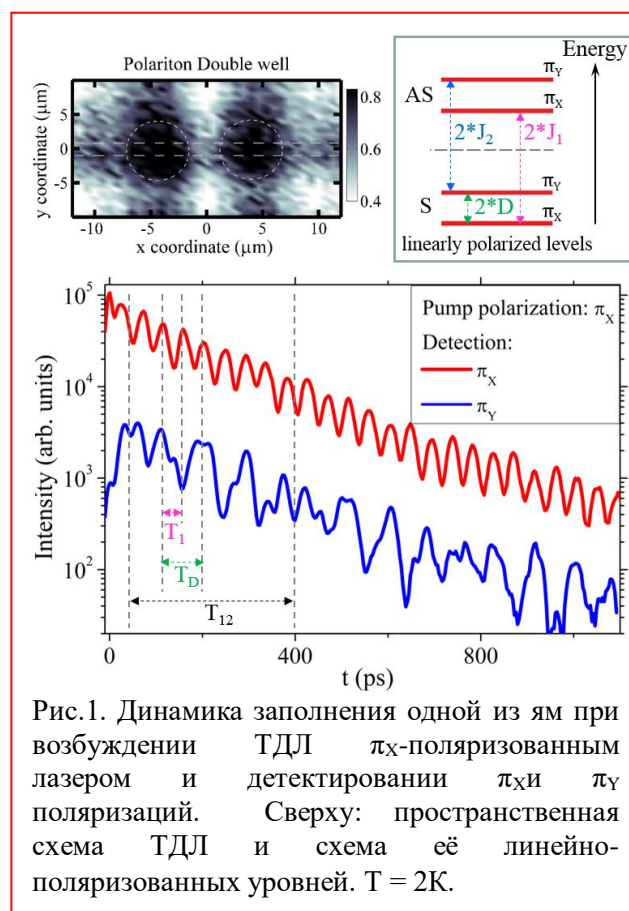


Рис.1. Динамика заполнения одной из ям при возбуждении ТДЛ π_x -поляризованным лазером и детектировании π_x и π_y поляризаций. Сверху: пространственная схема ТДЛ и схема её линейно-поляризованных уровней. $T = 2K$.

Литература

- [1] С.С. Гаврилов, УФН, 190, с. 137 (2020).

Преобразование поляризации излучения квантовых точек в волноводных метаструктурах с помощью плазмонных решёток

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

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

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

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

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

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

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

В настоящее время значительные исследовательские усилия направляются на развитие интегральной фотоники и, в частности, на изучение взаимодействия плазмонных метаповерхностей с оптическим полем. Даже несмотря на высокие джоулевы потери, плазмонные дифракционные решетки (ПР) позволяют эффективно управлять светом вследствие возбуждения в них локализованных поверхностных плазмонов.

В представленной работе исследована способность золотых ПР преобразовывать поляризацию излучения оптически возбуждаемых InAs квантовых точек (КТ) в GaAs волноводных метаструктурах. Показано, что при нерезонансной оптической накачке КТ возбуждаются TE-волноводные моды, распространяющиеся в направлениях основных периодов ПР. В зависимости от ячейки ПР данные моды могут выводиться свет с высокой (до 0.9) степенью линейной (рис.1a) или циркулярной поляризации (рис.1b) [1]. Таким образом, полученные результаты обладают практическим потенциалом в плане, например, реализации градиентных метаповерхностей, эффективных встроенных источников или разветвителей света с циркулярной поляризацией на TE-волноводных модах.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

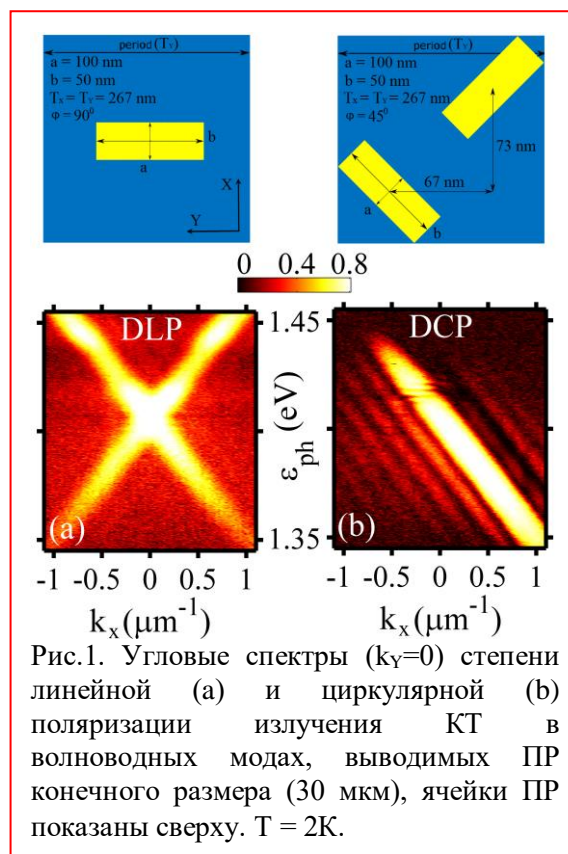


Рис.1. Угловые спектры ($k_y=0$) степени линейной (a) и циркулярной (b) поляризации излучения КТ в волноводных модах, выводимых ПР конечного размера (30 мкм), ячейки ПР показаны сверху. $T = 2\lambda$.

Литература

- [1] I.M. Fradkin, A.A. Demenev, V.D. Kulakovskii, V.N. Antonov and N.A. Gippius, arXiv:2202.13979 (2022).

Спиновый транспорт в квантово-холловском изоляторе

Л.В.Кулик,*А.С.Журавлёв, А.А.Загитова*ИФТТРАН им. Ю.А.**Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: kulik@issp.ac.ru*

На данный момент одной из быстроразвивающихся областей физики твёрдого тела является спинтроника. Среди основных задач спинтроники можно выделить поиск возможностей управления спиновыми токами, которые способны протекать без переноса заряда и массы. В частности, было установлено, что в магнанных системах возможно осуществить бездиссипативный транспорт путём создания высокотемпературной бозе-эйнштейновской конденсации магнонов. Также существуют экспериментальные исследования, посвящённые манипулированию скирмионами, вихреподобными спиновыми структурами. Данная работа направлена на исследование переноса спина на большие расстояния в магнитофермионном конденсате, образующемся в квантовом холловском изоляторе $\nu = 2$ благодаря наличию неравновесного ансамбля спин-триплетных магнитоэкситонов — составных бозонов.

В холловских изоляторах электронные возбуждения называют магнитоэкситами, аналогично магнитоэкситонам в полупроводниках. Одним из простейших примеров возбуждения при факторе заполнения $\nu = 2$ является магнитоэкситон, образованный возбуждённым электроном на первом уровне Ландау и дыркой на полностью заполненном нулевом уровне Ландау. При этом возбуждения можно разделить на спин-синглетные с полным спином $S = 0$ и спин-триплетные с полным спином $S = 1$ [1]. Последние отличаются рекордно большими временами жизни, и при низких температурах можно наблюдать переход двумерной электронной системы в новое коллективное состояние — магнитофермионный конденсат [2]. Предложен новый экспериментальный оптический метод, основанный на фотолюминесценции и фотоиндуцированном резонансном отражении, для исследования переноса спина на большие расстояния в магнитофермионном конденсате [3]. Установлено, что конденсат может растекаться на макроскопически большие расстояния порядка 200 мкм. Измеренная скорость распространения долгоживущих спиновых возбуждений составляет 25 м/с. Поскольку локальная пространственная плотность электронов не меняется, при транспорте спиновых экситонов не происходит ни перенос заряда, ни перенос массы. Данный транспорт характеризуется только переносом энергии и спина.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] Kulik, L.V., Gorbunov, A.V., Zhuravlev, A.S., Timofeev, V.B., Dickmann, S., Kukushkin, I.V., Sci. Rep. 5, 10354 (2015).
- [2] Kulik, L.V., Zhuravlev, A.S., Dickmann, S., Gorbunov, A.V., Timofeev, V.B., Kukushkin, I.V., Schmult, S., Nat. Commun., 7, 13499 (2016).
- [3] Zagitova, A. A., Zhuravlev, A. S., Kulik, L. V., Umansky, V., Appl. Sci., 11, 8131 (2021).

Прямые и непрямые экситоны и трионы в двойной квантовой яме MoSe₂/WSe₂ в Ван-дер-Ваальсовых гетеструктурах

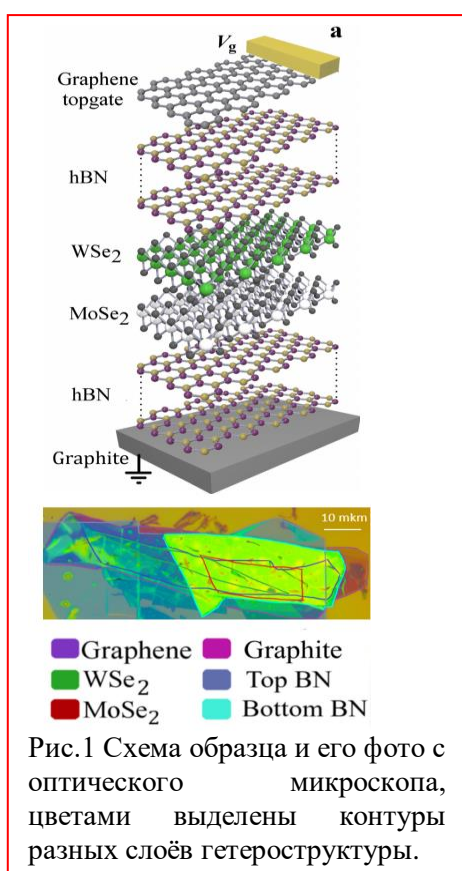
А.С.Бричкин,^{1*} Г.М.Голышков,^{1,2} А.В.Черненко¹

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

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

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

В гетероструктурах на основе монослоёв WSe₂ и MoSe₂ дихалькогенидов переходных металлов, представляющих собой двойную квантовую яму второго типа, в оптических измерениях наблюдаются линии фотолюминесценции (ФЛ) нейтральных и заряженных прямых и непрямых экситонов.



Монослои WSe₂ и MoSe₂ инкапсулированы слоями гексагонального нитрида бора (hBN), которые, в свою очередь, помещены между нижним слоем графита и верхним слоем графена выполняющими роль затворов, к которым приложено внешнее напряжение V_g (рис.1). Линии ФЛ прямого экситона и триона с шириной линии 2-8 мэВ хорошо различаются в спектре ФЛ в широком диапазоне температур (1.6-120 К), в то время как наблюдение линий непрямого экситона оказываются существенным образом осложнены из-за флуктуаций случайного потенциала, и ширина линии может достигать 100 мэВ. Для того, чтобы эффективно управлять спектром ФЛ непрямых экситонов и трионов, положением линии, её интенсивностью и шириной необходимо приложить внешнее электрическое поле [1]. Для этого методом механической эксфолиации и последовательной сборки слоёв изготовлены гетероструктуры, в которых электрические контакты подведены к слою графита, лежащему на подложке Si/SiO₂ и верхнему слою графена. Между этими слоями последовательно помещались нижний слой hBN, монослои WSe₂ и MoSe₂, верхний слой hBN. Линии ФЛ непрямого экситона и триона удаётся идентифицировать в спектре

при приложении электрического поля и в серии по температуре в диапазоне 1.6-120 К, однако эти линии остаются заметно шире и слабее по интенсивности линий прямого экситона и триона и наблюдаются только на небольших участках образца характерным размером 1-2 мкм [1].

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] E. V. Calman, L.H. Fowler-Gerace D.J. Choksy et al. NanoLetters, 20 (3), 1869 (2020)

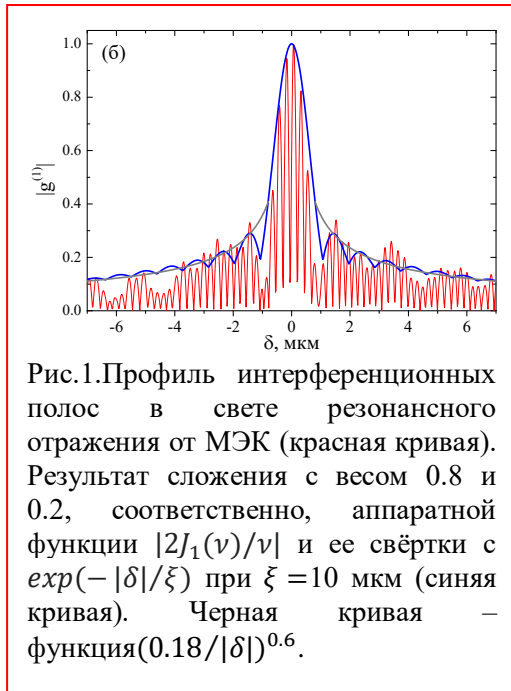
Когерентные свойства конденсата магнитоэкситонов в квантово-холловском диэлектрике

А.В.Горбунов,* А.В.Ларионов, В.Б.Тимофеев

ИФТТРАН им. Ю.А.

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

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



Триплетные циклотронные магнитоэкситоны или спин-флип экситоны в квантово-холловском диэлектрике – это композитные бозоны со спином 1. При температурах $T < 1$ К их время жизни достигает ~ 1 мс, поэтому удается достичь концентрации $n_{ex} \sim (1-10)\%$ от плотности квантов магнитного потока с помощью достаточно слабого фотовозбуждения, избегая тем самым перегрева системы. В результате в холловском диэлектрике ($\nu = 2$) образуется качественно новая фаза – магнитоэкситонный конденсат (МЭК) [1] – пример бозонной конденсации в пространстве обобщенных импульсов. МЭК может растекаться из пятна фотовозбуждения на макроскопические расстояния. В квантовой яме GaAs/AlGaAs шириной 35 нм с электронной концентрацией $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $15 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ транспортная длина спин-флип экситонов в конденсате оказывается, по крайней мере, на три порядка больше, чем длина их диффузии в газовой фазе [2]. При этом скорость разбегания экситонов из пятна накачки достигает

$\sim 10^3 \text{ см/с}$.

С использованием методов сдвиговой интерферометрии проведены измерения поперечной длины когерентности ξ при диагностировании ансамбля спин-флип экситонов с помощью отражения света, соответствующего переходу между нулевыми уровнями Ландау валентной зоны и зоны проводимости. В отраженном свете обнаружены две компоненты: некогерентное излучение от газа надконденсатных магнитоэкситонов (длина когерентности $\xi \lesssim 0.1$ мкм) и излучение магнитоэкситонного конденсата, для которого $\xi \sim 10$ мкм и более [3]. Полученный результат согласуется с выводами работы [4], согласно которой ансамбль спин-флип экситонов в холловском диэлектрике всегда является неравновесным и состоит из экситонного газа с обобщенными импульсами $q \simeq 0$ и конденсата экситонов в энергетическом минимуме с импульсами порядка обратной магнитной длины $q_{min} \sim 1/l_B \approx 10^6 \text{ см}^{-1}$.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

- [1] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, S. Dickmann, A.V. Gorbunov, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, S. Schmult, NatureComm. 7, 13499 (2016).
- [2] L.V. Kulik, V.A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A.V. Gorbunov, V.V. Solovyev, V.B. Timofeev, I.V. Kukushkin, S. Schmult, ScientificReports 8, 10948 (2018).
- [3] А.В. Горбунов, А.В. Ларионов, Л.В. Кулик, В.Б. Тимофеев, Письма в ЖЭТФ 114, 479 (2021).

[4] А.С. Журавлёв, В.А. Кузнецов, А.В. Горбунов, Л.В. Кулик, В.Б. Тимофеев, И.В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 110, 260 (2019).

ISBN 978-5-6045956-1-9

