

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

имени Ю. А. Осипьяна

Российский научный фонд (РНФ)

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

Сборник тезисов



*3-4 июня 2025 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

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

3-4 июня 2025 года

г. Черноголовка, Московская обл.

Программный комитет:

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

Организационный комитет:

1. **Кукушкин Игорь Владимирович** (ИФТТ, Черноголовка) – председатель
2. **Морозова Елена Николаевна** (ИФТТ, Черноголовка)
3. **Макаровская Светлана Михайловна** (ИФТТ, Черноголовка)
4. **Федотова Яна Викторовна** (ИФТТ, Черноголовка)
5. **Лангваген Екатерина Сергеевна** (ИФТТ, Черноголовка)

ISBN 978-5-6053681-2-0



9 785605 368120 >

ISBN 978-5-6053681-2-0

ОГЛАВЛЕНИЕ

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

<u>В.М. Муравьев</u> , И.В. Кукушкин. Природа плазменных возбуждений в плазмонном кристалле -----	7
<u>И.В. Андреев</u> , В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Поперечные плазмон-поляритоны в двумерных электронных системах с произвольной проводимостью заднего затвора -----	8
С.А. Андреева, А.В. Щепетильников, К.Р. Джикирба, В.В. Соловьев, <u>И.В. Кукушкин</u> . Плазменные возбуждения в системе сверхпроводящих электронов в тонких пленках NbN -----	9
<u>К.Р. Джикирба</u> , А. Шуваев, Д. Худайбердиев, А.С. Астраханцева, И.В. Кукушкин, В.М. Муравьев. Плазмонный отклик метаповерхности, созданной решеткой из двумерных электронных полос -----	10
<u>П.А. Гусихин</u> , В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Усиление электромагнитного поля СВЧ-диапазона в планарных резонаторах -----	11
В.А. Волков. К теории ТЕ плазменных волн в 2D электронных системах -----	12
А.А. Заболотных. Теория плазменных колебаний в периодических двумерных системах	13
<u>И.В. Загороднев</u> , Д.А. Родионов. Плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах с близким металлическим затвором -----	14

СЕКЦИЯ 2. ФИЗИКА 2Д-ЭЛЕКТРОНОВ. КЭХ.

<u>А.В. Ларионов</u> , Л.В. Кулик. Методика измерения сигнала резонансного фотоотражения с помощью двухцветного лазерного возбуждения в геометрии накачка-зондирование -----	15
С.А. Андреева, А.В. Щепетильников, Г.А. Николаев, А.Р. Хисамеева, И.В. Кукушкин. Критическая температура псевдоспинового ферромагнитного фазового перехода вблизи фактора заполнения $\nu = 2$ -----	16
<u>С.И. Дорожкин</u> , А.А. Капустин. Дробный квантовый эффект Холла со знаменателем четыре в одиночных ямах GaAs с двухслойными электронными системами -----	17
<u>А.В. Горбунов</u> , А.В. Ларионов, Л.В. Кулик. Магнитоэкситонный конденсат в квантово-холловском диэлектрике: растекание и когерентность -----	18
<u>Д.А. Щигарев</u> , А.В. Ларионов, Л.В. Кулик. Экранирование экситонных состояний в лафлиновских и джейновских жидкостях -----	19
<u>П.С. Бережной</u> , А.С. Кореев, А.Б. Ваньков, В.В. Соловьев. Изучение спиновых свойств двумерной системы в сильном магнитном поле методом поляризованной люминесценции -----	20
<u>А.С. Кореев</u> , П.С. Бережной, А.Б. Ваньков, И.В. Кукушкин. Аномальное поведение резонансного отражения вблизи $\nu = 1$ как индикатор нетривиальной спиновой поляризации в двумерной электронной системе -----	21

СЕКЦИЯ 3. ЭКСИТОНЫ-ПОЛЯРИТОНЫ. ФИЗИКА 2Д-ЭЛЕКТРОНОВ.

<u>А.А. Деменев</u> , Н.Н. Ипатов, С.С. Гаврилов и В.Д. Кулаковский. Динамика двумерных экситон-поляритонных систем, резонансно возбуждаемых в квадратных мезах высокочастотных микрорезонаторов -----	22
<u>А.А. Максимов</u> , И.И. Тартаковский. Дисперсия электромагнитных мод в полупроводниковых наноструктурах с хиральными фотонными кристаллами -----	23
<u>Н.Н. Ипатов</u> , С.С. Гаврилов, А.А. Деменев, В.Д. Кулаковский. Особенности оптического отклика латерально ограниченной экситон-поляритонной системы -----	24

СЕКЦИЯ 4. НОВЫЕ СИСТЕМЫ. SERS.

<u>В.Е. Бисти</u> , Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, А.В. Черненко. Многочастичные комплексы в инкапсулированных монослоях дихалькогенидов переходных металлов -----	25
<u>А.В. Черненко</u> , А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, В.Е. Бисти. Эффект Штарка в монослоях ДПМ, инкапсулированных hBN -----	256
<u>Д.В. Еналдиев</u> . Дислокации и междоменные межслоевые упругие волны в релаксированных сверхрешетках муара -----	27
<u>Г.М. Голышков</u> , А.С. Бричкин, В.Е. Бисти, А.В. Черненко. Экситонные состояния в гетероструктурах с монослоями MoSe ₂ и WSe ₂ при изменении зарядовой плотности -----	28
<u>Г.А. Николаев</u> , Т.М. Курбанов, С.А. Андреева, О.В. Орлов, А.В. Щепетильников, И.В. Кукушкин. Микроволновая спектроскопия слоистых материальных систем на основе графена в режиме квантового эффекта Холла -----	29
<u>Д.С. Тихонова</u> , Е. Андреев, А.Н. Нечаев, В.И. Кукушкин, Е.Г. Завьялова. Разработка аптамерной тест-полоски на основе ПЭТФ мембраны -----	30
<u>Д.Г. Громов</u> , Р.Л. Волков, С.В. Дубков, Т.С. Гришин, Д.В. Новиков, Н.И. Боргардт. Самоорганизация массива наночастиц Ag и Au на инертной поверхности в процессе PVD и отжига -----	31

СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ.

<u>В.А. Мушенков</u> , В.И. Кукушкин, Е.Г. Завьялова. Применение водорастворимых тетразолов для определения антибиотикорезистентности -----	32
<u>Д.Н. Артемьев</u> , Л.А. Братченко, А.А. Карманова, В.И. Кукушкин, В.М. Зуев. Анализ поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света в плазме крови пациентов со злокачественными и доброкачественными новообразованиями эндометрия в сравнении с контрольной группой -----	33
<u>В.Д. Бобова</u> , В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Разработка ГИС датчика мощности -----	34
<u>А.С. Бричкин</u> , Г.М. Голышков, В.Е. Бисти, А.В. Черненко. Межслоевой экситон в структурах на основе монослоев MoSe ₂ и WSe ₂ под действием электрического поля -----	35
<u>Е.М. Буданов</u> , А.В. Ларионов, Л.В. Кулик. Измерение плотности состояний магнитоплазмонов в двумерной электронной системе на факторе заполнения $\nu = 1$ -----	36

<u>Ю.В. Чумаченко, Д.В. Новиков, С.А. Кондратьева, С.В. Дубков, Д.Г. Громов, Л.С. Волкова.</u> Формирование управляемых недеградирующих ГКР-активных структур на основе тонкой пленки Ag-Nb для фотонной сенсорики -----	37
<u>А.И. Дмитриев, М.С. Дмитриева.</u> Магнитная анизотропия в $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ -----	38
<u>А.И. Дмитриев, М.С. Дмитриева.</u> Магнитный гистерезис в $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ -----	39
<u>А.А. Гаврилов, В.А. Мещеряков, С.Ю. Цовьянов, М.В. Лебедев, О.В. Мисочко, Г.Б. Лесовик.</u> Схема коллинеарного вырожденного спонтанного параметрического рассеяния II типа для измерения квантовых эффективностей -----	40
<u>А.С. Калашникова, Д.В. Сыч.</u> Влияние погрешностей приготовления и считывания квантовых состояний на безопасность квантового распределения ключей -----	41
<u>А.С. Казаков, И.С. Шинко, И.В. Андреев, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин.</u> Перестраиваемый метаматериал на основе двумерной электронной системы в геометрии разрезного кольцевого резонатора -----	42
<u>М.Д. Кружалина, Д.В. Новиков, А.О. Козлов, Л.С. Волкова, П.А. Данилов, И.Н. Сараева, С.В. Дубков, С.И. Кудряшов.</u> Модифицированная фемтосекундным лазерным импульсом планарная кремниевая подложка с наночастицами серебра для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света -----	43
<u>А.С. Астраханцева, В.Е. Кирпичев, Т.Д. Рудаков, И.В. Кукушкин.</u> Применение когерентных антенных решеток для гигантского усиления рамановского рассеяния света в цельнометаллических SERS-подложках -----	44
<u>С.В. Зайцев, В.Д. Седых, А.В. Кузьмин, К.П. Мелетов.</u> Фазовое расслоение под давлением в слаболегированном манганите $\text{La}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_3$ -----	45
<u>В. Никонов, Д.А. Родионов, А.А. Заболотных.</u> Магнитодисперсия плазмонов в 2D системе в форме диска с боковым омическим контактом -----	46
<u>Д.С. Нураев, Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, А.В. Черненко.</u> Исследование температурной зависимости спектральных характеристик гетероструктур на основе монослоев MoSe_2 --	47
<u>А. Охрименко, Ю.М. Белоусов.</u> Расчет структуры мультиплетов $^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2}$ и $^4\text{I}_{11/2}$ иона эрбия Er^{3+} в оптических световодах -----	48
<u>А.Ю. Осичева, А.Ю. Шахматов, Д.В. Сыч.</u> Высокоточная однопиксельная классификация объектов для терагерцового диапазона -----	49
<u>М.Э. Парфенов, Д.Н. Артемьев, Д.В. Корнилин.</u> Портативный спектрометр с детектором на основе линейки фотодиодов для регистрации комбинационного рассеяния -----	50
<u>М.М. Прутовых, Г.Б. Лесовик.</u> Разработка многопиксельного детектора фотонов на основе сверхпроводящих проволок -----	51
<u>Т.Е. Пылаев, В.И. Кукушкин.</u> Мультимаркерная спектральная система защиты жидкостей от контрафакта -----	52
<u>Д.А. Родионов, И.В. Загороднев.</u> Плазмоны в двумерной электронной системе в форме диска с анизотропией массы носителей заряда -----	53
<u>Д.Р. Сафин, Ю.М. Белоусов.</u> Применение алгоритма переноса поляризации в органических молекулах с неэквивалентными связанными спинами -----	54
<u>С.В. Зайцев, -----, К.П. Мелетов.</u> Комбинационное рассеяния света в слаболегированных манганитах $(\text{La}, \text{Ca})\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_3$ -----	55
<u>А.В. Щепетильников, А.Р. Хисамеева, Я.В. Федотова, А.А. Дрёмин, И.В. Кукушкин.</u> Время отклика плазмонного детектора на основе кремния -----	56

Г.А. Николаев, О.В. Орлов, <u>А.В. Щепетильников</u> , С.А. Андреева, Я.В. Федотова, А.А. Дрёмин, И.В. Кукушкин. Время-разрешенный микроволновый отклик 2D электронной системы -----	57
<u>И.С. Шинко</u> , А.С. Казаков, И.В. Андреев, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Поперечные плазмон-поляритоны в «тонкой структуре» циклотронного резонанса в экранированном двумерном электронном газе -----	58
<u>М.С. Соколова</u> , А.А. Титенко, С.М. Макаровская, В.Д. Бобова, И.В. Кукушкин, В.М. Муравьев. Субтерагерцовый амплитудный модулятор на основе кремниевого PIN-диода	59
<u>А.Ю. Субекин</u> , В.И. Кукушкин, Т.Д. Рудаков, Е.В. Рудакова, Е.Н. Морозова, С.В. Дубков. Спектроскопия комбинационного рассеяния как метод диагностики сахарного диабета -	60
<u>А.А. Титенко</u> , М.С. Соколова, С.М. Макаровская, В.В. Соловьев, В.Д. Бобова, И.В. Кукушкин, В.М. Муравьев. Субтерагерцовый амплитудный модулятор с перестраиваемой метаповерхностью -----	61
С.В.Зайцев. Оптическая ориентация в сильнолегированных диодных структурах InGaAs/GaAs -----	62
С.В.Зайцев. Люминесценция квантовых точек CdSe в микродисках ZnSe/ZnMgSSe-----	63
С.В.Зайцев. Оптическая характеристика магнитных нанопроволок (GaMn)As-----	64
<u>Д.В. Белякова</u> , М.Д. Кружалина, А.М. Тарасов. Получение титаната бария, модифицированного оловом, для дозиметрии оптического излучения-----	65
<u>Д.Д. Бутманов</u> , Т.П. Савчук, М.Ю. Прудникова. Разработка матричного сенсора механических нагрузок для определения опасных состояний технических систем-----	66
<u>С.А. Кондратьева</u> , Д.В. Новиков, Г.А. Меденков, Л.С. Волкова, А.С. Ерофеев, В.С. Колмагоров, и Ю.Н. Пархоменко. Моделирование усиления ГКР-активного слоя тонкой плёнки системы Mo-Ag на поверхности СИПМ-пипетки -----	67
<u>М.Ю. Прудникова</u> , И.Ю. Белоконева, Э.И. Струкова, Д.В. Новиков, Т.П. Савчук. Изготовление самоупорядоченного массива плазмонных наностержней на основе матрицы анодного оксида алюминия -----	68

Природа плазменных возбуждений в плазмонном кристалле

В.М. Муравьев,* И.В. Кукушкин

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

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

Плазмонный кристалл представляет собой двумерную электронную систему (ДЭС) с периодическим затвором, нанесённым на поверхность кристалла. Пионерские эксперименты по изучению плазменных волн в полупроводниковых двумерных системах были проведены более 40 лет тому назад именно на плазмонном кристалле [1, 2]. С тех пор эта система стала платформой для открытия множества новых физических явлений. Среди примеров можно упомянуть наблюдение мини-зон в плазмонном спектре, двумерных плазмонов в слоистых материалах и различных плазмонных кристаллических фаз.

В настоящей работе исследованы плазменные возбуждения в спектре пропускания плазмонного кристалла, изготовленного из полупроводниковой гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Эксперимент показал, что плазмонный кристалл поддерживает только одну фундаментальную плазменную моду с волновым вектором $q=2\pi/p$ (p – период плазмонного кристалла), которая переходит из неэкранированного состояния при узких затворах в экранированное состояние для широких затворов. Мы разработали аналитический подход, с помощью которого удалось точно предсказать частоту и ширину плазменных возбуждений в плазмонном кристалле.

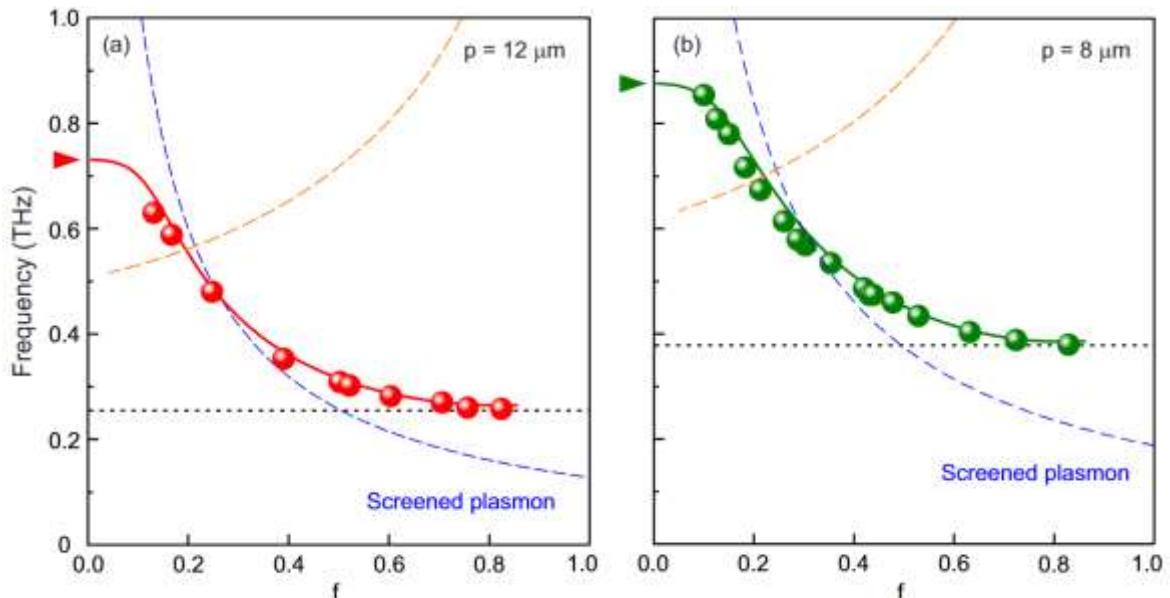


Рис.1. Частота фундаментальной плазменной моды в зависимости от фактора заполнения затворов $f=lg/p$, измеренная для двух периодов плазмонного кристалла $p=8$ и $12 \mu\text{м}$. Электронная концентрация $n=1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Расстояние от затворов до ДЭС $0.22 \mu\text{м}$.

Литература

- [1] Allen Jr., S. J. and Tsui, D. C. and Logan, R. A., Phys. Rev. Lett. 38, 980 (1977).
- [2] Theis, T. N. and Kotthaus, J. P. and Stiles, P. J., Solid State Commun. 24, 273 (1977).

Поперечные плазмон-поляритоны в двумерных электронных системах с произвольной проводимостью заднего затвора

И.В. Андреев,* В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

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

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

Принципиальное значение для описания коллективной динамики носителей заряда в плазме имеет задача классификации собственных мод по симметрии и другим свойствам. До недавнего времени в физике плазменных волн в двумерных электронных системах (ДЭС) считалось, что все плазменные моды в ДЭС носят исключительно продольный характер. Однако недавно было обнаружено, что в ДЭС на диэлектрических подложках конечной толщины возможно возникновение принципиально другого типа мод – поперечных плазмон-поляритонов [1]. Такие поперечные плазменные моды в ДЭС отвечают синфазным колебаниям носителей заряда в плоскости ДЭС как целого при возбуждении нормально падающей электромагнитной волной, а их частота явным образом зависит от толщины диэлектрической подложки.

К настоящему моменту точная аналитическая теория поперечных плазмон-поляритонов в ДЭС построена для двух предельных случаев: поперечные плазмон-поляритоны в пропускании ДЭС на подложке без заднего затвора [2], и поперечные плазмон-поляритоны в поглощении ДЭС на подложке с идеально проводящим задним затвором [3]. Представляет интерес построить более общую теорию для поперечных плазмон-поляритонов в ДЭС на диэлектрической подложке с задним затвором с произвольным значением проводимости. Такая теория, в частности, позволит получить непрерывный переход между уже рассмотренными предельными случаями.

В данной работе получены точные аналитические выражения для коэффициентов отражения и поглощения ДЭС на диэлектрической подложке с задним затвором с произвольным значением проводимости в перпендикулярном магнитном поле. Из анализа выражения для коэффициента поглощения получены магнитодисперсионные зависимости для поперечных плазмон-поляритонов. Показано, что эти моды являются результатом гибридизации циклотронного резонанса в ДЭС и резонансов Фабри-Перо в подложке. Показано, что магнитодисперсия определяется двумя безразмерными параметрами, один из которых характеризует силу плазмон-фотонного взаимодействия, а второй – граничное условие для отражения электромагнитной волны в плоскости заднего затвора.

Литература

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

Плазменные возбуждения в системе сверхпроводящих электронов в тонких пленках NbN

С.А. Андреева,^{1,2,*} А.В. Щепетильников,² К.Р. Джикирба,² В.В. Соловьев,²
И.В. Кукүшкин²

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

²ИФТТ РАН им. Ю. А. Осипьяна, 142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

*lopatina@issp.ac.ru

Тонкие сверхпроводящие пленки NbN обладают сравнительно высокой критической температурой, большим критическим током и химически стабильны, поэтому вызывают повышенный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Понижение размерности сверхпроводника с трехмерной до двумерной приводит к изменению электронных, термодинамических и оптических свойств материала и к возникновению новых неожиданных эффектов. В прикладных задачах тонкие пленки NbN находят применение в однофотонных детекторах, болометрах горячих электронов и СКВИДах.

Помимо хороших перспектив использования тонких сверхпроводящих пленок в этих системах имеется целый ряд нерешенных проблем фундаментального характера. Например, в таких низкоразмерных электронных системах не были надежно установлены плазменные и магнитоплазменные возбуждения, хотя именно такие коллективные моды являются основным инструментом для исследования свойств низкоразмерных электронных систем в полупроводниковых структурах. Главной проблемой для обнаружения плазменных возбуждений в системе сверхпроводящих электронов является очень большая (по сравнению с полупроводниковыми системами) электронная плотность, что приводит к большой частоте плазменных возбуждений, превышающей сверхпроводящую щель. В этих условиях плазменные возбуждения оказываются сильно затухающими и их невозможно наблюдать. Поскольку частоту плазменных возбуждений в двумерных электронных системах можно уменьшать вплоть до нуля путем уменьшения волнового вектора возбуждений (например, с помощью увеличения размеров образца), то кажется, что плазменную частоту всегда можно уменьшить этим способом до величины значительно меньшей, чем сверхпроводящая щель. Однако это не так, поскольку при малых волновых векторах плазмон-поляритонная мода становится практически чисто световой (из-за сильных эффектов запаздывания) и перестает зависеть от концентрации электронов, а также от магнитного поля.

В настоящей работе представлены первые результаты по обнаружению плазменных волн в системе сверхпроводящих электронов в тонких пленках NbN. Для преодоления указанных выше проблем мы использовали очень тонкие пленки NbN, в которых концентрация сверхпроводящих электронов была значительно уменьшена по сравнению с полной электронной плотностью. В этих условиях нами были обнаружены особенности резонансного пропускания ТГц излучения, которые зависели от размера электронной системы. Установлено, что эти резонансы исчезали при температурах выше критической (T_c). Кроме того, показано, что по мере увеличения температуры вплоть до T_c наблюдался сдвиг резонансной частоты в сторону меньших частот (за счет уменьшения плотности сверхпроводящих электронов), а также наблюдалось значительное уширение резонансных особенностей. Измерена дисперсия плазменных возбуждений и определен параметр запаздывания.

Плазмонный отклик метаповерхности, созданной решеткой из двумерных электронных полос

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

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

²Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, 1040 Vienna, Austria
*e-mail: dzhikirba.kr@phystech.edu

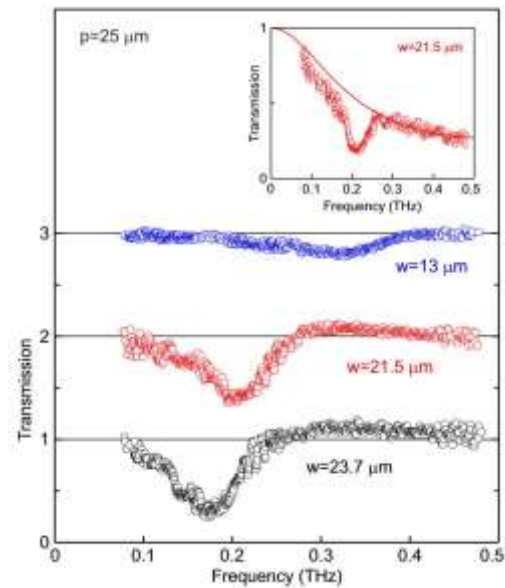
Плазменные возбуждения в двумерных системах изучаются более пятидесяти лет. Эти исследования привели к открытию множества новых фундаментальных физических результатов [1]. Мы исследуем гетероструктурные мембраны GaAs/AlGaAs с метаповерхностью, состоящей из массива полос двумерной электронной системы (2DES). Эксперименты выявили сильный плазменный резонанс в пропускании метаповерхности. Мы обнаружили, что боковое экранирование электромагнитного поля приводит к значительному смещению частоты плазмона, поскольку зазор между полосами сокращается до нуля. Мы обнаружили, что фаза электромагнитного излучения демонстрирует сдвиг при прохождении метаповерхности.

Образцы были изготовлены из промышленных гетероструктур AlGaAs/GaAs/AGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Пластина имеет квантовую яму шириной 20 нм, выращенную на расстоянии 210 нм под поверхностью кристалла. Квантовая яма содержит 2DES с плотностью $n_s = 9.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Полупроводниковая пластина была разрезана на образцы размером $1 \times 1 \text{ см}^2$. Затем мы литографически изготовили массив полос 2DES. Для восьми образцов период метаповерхности был фиксирован $p=25 \text{ мкм}$, а ширина полосы варьируется от $w=13 \text{ мкм}$ до 24 мкм . Все образцы были протравлены с обратной стороны раствором лимонной кислоты для получения однородной мембраны, толщина которой варьировалась для разных образцов от 35 мкм до 45 мкм [2].

Мы изучили терагерцовый отклик полупроводниковой мембраны с решетчатой 2DES. Если длина волны падающего излучения намного больше периода решетки, разработанное устройство ведет себя как метаматериал, плазмонные свойства которого могут быть спроектированы геометрией 2DES. Кроме того, электродинамический отклик метаматериала продемонстрировал большую анизотропию относительно направления поляризации. В частности, когда излучение поляризовано перпендикулярно полоскам, метаматериал теряет свои плазмонные свойства. Представленные устройства для проверки концепции были реализованы с GaAs 2DES при криогенной температуре. Однако было показано, что возбуждение плазменных волн при комнатной температуре возможно на терагерцовых и инфракрасных длинах волн как с GaAs 2DES, так и с графеном. Таким образом, предлагаемая концепция плазмонного метаматериала может быть расширена до более высоких частот, что позволит применять его при комнатной температуре.

Литература

- [1] A. Shuvaev, V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, J. Gospodarič, A. Pimenov, I. V. Kukushkin, Discovery of Two-Dimensional Electromagnetic Plasma Waves. Phys. Rev. Lett. (2021)
- [2] A. S. Astrakhantseva, A. Shuvaev, P. A. Gusikhin, A. Pimenov, I. V. Kukushkin, and V. M. Muravev, Terahertz plasma edge engineering in semiconductor membranes with a two dimensional electron layer//Appl. Phys. Lett. 120, 031104 (2022).



Усиление электромагнитного поля СВЧ-диапазона в планарных резонаторах

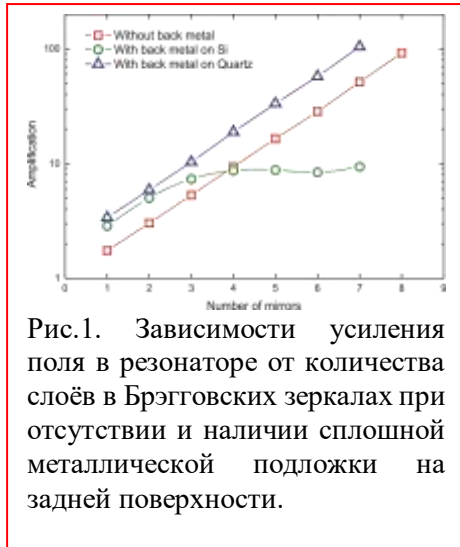
П.А. Гусихин,* В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: gusikhin@issp.ac.ru*

Рис.1. Зависимости усиления поля в резонаторе от количества слоёв в Брэгговских зеркалах при отсутствии и наличии сплошной металлической подложки на задней поверхности.

В данной работе было проведено численное моделирование пропускания и усиления электромагнитного поля в планарных резонаторах, ограниченных различными типами отражателей: диэлектрические брэгговские зеркала, металлические решётчатые зеркала и сплошные металлические зеркала.

Ранее [1] было показано, что решётчатые металлические структуры на диэлектрической подложке проявляют плазменные свойства: резонансная частота имеет плазменный сдвиг относительно частоты, соответствующей укладыванию половины длины волны на толщине подложки. Кроме того, на резонансной частоте наблюдалось усиление электромагнитного поля, которое было применено для увеличения чувствительности детекторов

субтерагерцового частотного диапазона [2, 3]. В данной работе были промоделированы структуры с различными значениями геометрических параметров: период металлической решётки и ширина образующих её полосок. Были получены оптимальные значения этих параметров по усилению электромагнитного поля в центре резонатора. Было показано, что усиление ограничено сверху числом ~ 9 из-за потерь в металле с конечной проводимостью.

Резонатор с Брэгговскими зеркалами представлял собой диэлектрическую (кремниевую) подложку с толщиной, соответствующей половине длины волны, ограниченную с двух сторон чередующимися слоями кварца и кремния с толщинами в четверть длины волны. Была получена зависимость усиления поля в центре резонатора от количества слоёв в Брэгговских зеркалах – она оказалась экспоненциальной (Рис. 1). Также, было показано, при каких условиях добавление сплошной металлической подложки сзади не приводит к существенным потерям в ней. В результате, в этом случае в усилении резонатора не обнаруживается глобального ограничения, как в случае с решётчатыми металлическими зеркалами.

Литература

- [1] Ueno K., Nozawa S., Misawa H. Opt. Express. V. 23. No. 22. P. 28584 (2015).
- [2] Хисамеева А.Р., Щепетильников А.В., Федотова Я.В. и др. Известия РАН. Серия физическая. Т. 87. № 2. С. 172 (2023).
- [3] Щепетильников А.В., Хисамеева А.Р., Федотова Я.В. и др. Известия РАН. Серия физическая. Т. 88. № 2. С. 180 (2024).

К теории ТЕ плазменных волн в 2D электронных системах

В.А. Волков**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7***e-mail: Volkov.V.A.@gmail.com*

Известно, что в плоскостойких структурах существует два независимых типа электромагнитных плазменных волн, продольные (ТМ моды) и поперечные (ТЕ моды). Именно такую геометрию имеют полупроводниковые структуры с 2D электронным газом, в которых плазмоны давно исследуются. Обычно, но не всегда, они являются продольными возбуждениями. Дело в том, что в идеале поперечные плазмоны реализуются только в случае, когда 2D электроны находятся в многослойной структуре волноводного типа. Именно поэтому учет волноведущего характера диэлектрической подложки, всегда присутствующей в реальных образцах, играет принципиально важную роль в построении адекватной теории поперечных плазменных волн (в отличие от продольных плазменных волн).

В работе сделана попытка построения в модели Друде простой аналитической теории спектра поперечных плазменных волн в 2D электронной плазме, помещенной на плоскопараллельную диэлектрическую пластину конечной толщины L и бесконечных латеральных размеров. В пределе малых L задача резко упрощается и сводится к решению эффективного уравнения Шредингера с короткодействующим потенциалом. Найдено и проанализировано выражение для закона дисперсии основной моды Фабри-Перо в зависимости от параметра запаздывания и друдевского времени релаксации. Обсуждена экспериментальная ситуация.

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

Теория плазменных колебаний в периодических двумерных системах

А.А. Заболотных*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7***e-mail: zabolotnyh_andre@mail.ru*

Плазменные колебания (плазмоны) в двумерных (2D) электронных системах (ЭС) исследуются уже почти полвека [1, 2]. Часто для более эффективного возбуждения плазмонов в 2D систему вносится разного рода периодичность как это было сделано, например, в упомянутых выше пионерских работах [1, 2], в которых вблизи 2D системы располагался периодический металлический затвор. Другой типичной системой является периодическая 2D ЭС в виде массива полос или дисков [3]. Однако, несмотря на давнюю историю экспериментальных исследований, плазменные колебания в таких системах не имеют должного, достаточно точного аналитического описания.

В настоящей работе теоретически исследованы плазменные возбуждения в однородной 2D ЭС с металлическими затворами в форме полос, а также периодической 2D ЭС без затворов. Для описания плазмонов в таких системах применялся развитый в работе [4] подход, основанный на решении уравнений Максвелла для полей плазменной волны, а также использовании локального закона Ома с проводимостью, найденной в рамках динамической модели Друде. Для аналитического описания частот плазменных резонансов использовались простейшие пробные функции для плотности тока плазменной волны, а именно полином второй степени или тригонометрические функции. Оказалось, что определенные таким образом плазмонные частоты находятся в отличном согласии с частотами, найденными экспериментально по спектру пропускания гигагерцового и терагерцового излучения через 2D систему на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs. Отметим пару интересных особенностей, обнаруженный при решении задачи. Во-первых, оказалось, что использованная в [4] пробная функция для плазмонной плотности тока (т.н. "эллиптическая модель") крайне неточно описывает частоты плазмонов, особенно в случае сравнимых поперечного размера затвора и периода системы. Во-вторых, было обнаружено, что для корректного описания частот плазменных резонансов необходимо учесть наличие тонкого (обычно 100-200 нм) слоя диэлектрика, отделяющего гетеропереход (или квантовую яму) от поверхности полупроводника.

Литература

- [1] S. J. Allen, Jr., D. C. Tsui, and R. A. Logan, Phys. Rev. Lett. 38, 980 (1977).
- [2] T. N. Theis, J. P. Kotthaus, and P. J. Stiles, Solid State Commun. 24, 273 (1977).
- [3] S. J. Allen, Jr., H. L. Stormer, and J. C. M. Hwang, Phys. Rev. B 28, 4875 (1983).
- [4] S. A. Mikhailov, Phys. Rev. B 58, 1517 (1998).

Плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах с близким металлическим затвором

И.В. Загороднев^{1*} Д.А. Родионов^{1,2}

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9*

*e-mail: igor.zagorodnev@gmail.com

Динамика магнитоплазменных колебаний в латерально ограниченной двумерной электронной системе, расположенной вблизи идеально проводящей металлической пластины (затвора), описывается точно такими же уравнениями, что и динамика гидродинамических волн в мелком бассейне той же геометрии, расположенном на вращающейся теле (планете) [1]. Таким образом все свойства плазменных колебаний в любой латерально ограниченной системе могут быть перенесены на гидродинамические волны, называемые в этом случае ротационно-гравитационными, при этом аналогом циклотронной частоты выступает частота Кориолиса.

В недавней экспериментальной работе [2] изучались плазменные колебания в системе в форме квадрата, в частности, зависимость их частоты от внешнего магнитного поля (магнитодисперсия). В нашей теоретической работе исследуются свойства собственных магнитоплазменных колебаний в двумерном электронном газе прямоугольной геометрии, расположенном вблизи затвора и помещенном в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Задача решалась в пределе сильной экранировки, т.е. рассматривался случай малости расстояния между электронным газом и металлом по сравнению со всеми характерными размерами в системе и длинами волн изучаемых плазменных колебаний.

Как и в работе [2], в магнитодисперсии плазменных колебаний наблюдается «расталкивание» мод. Кроме этого, частоты всех плазменных мод в сильных магнитных полях стремятся к нулю, включая фундаментальную. Это отличается от известного поведения магнитодисперсии фундаментальной моды, являющейся краевым магнитоплазмоном, в других геометриях таких как диск, полоса или полуплоскость [3], где частота принимает ненулевое асимптотическое значение. В частном случае квадратной геометрии, получены аналитические аппроксимации магнитодисперсий трёх нижайших по частоте плазменных мод. Установлено, что в сильных магнитных полях частоты всех мод обратно пропорциональны циклотронной частоте.

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

Литература

- [1] D.A. Rodionov, I.V. Zagorodnev, Phys. Rev. B 109, L241402 (2024).
- [2] A.M. Zarezin, D. Mylnikov, A.S. Petrov, D. Svintsov, P.A. Gusikhin, I.V. Kukushkin, V.M. Muravev, Phys. Rev. B 107, 075414 (2023).
- [3] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, Nanomaterials 13, 975 (2023).

Методика измерения сигнала резонансного фотоотражения с помощью двухцветного лазерного возбуждения в геометрии накачка-зондирование

А.В. Ларионов,* Л.В. Кулик

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

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



В работе изучалась временная динамика сигнала резонансного фотоотражения при дробном ($\nu=1/3$) факторе заполнения двумерных электронов в 17 нм GaAs квантовой яме (КЯ) при гелиевых температурах $T \sim 0.6$ К. Для этого была собрана специальная оптическая установка с использованием двух непрерывно перестраиваемых лазеров в геометрии накачка-зондирование (рис.1). Данная оптическая схема является модернизацией ранее проведенного нами эксперимента (см. [2]), где использовался только один лазер. Полупроводниковый лазер, перестраиваемый по длине волны в диапазоне 750-850 нм (T-Optica), использовался в качестве зондирующего. Пучок второго, накачивающего лазера (титан-сапфировый лазер, Tsunami) модулировался с помощью механического затвора, на который подавались управляющие импульсы с генератора (DG 645) различной длительностью и скважностью в секундном

и субсекундном временном интервале. Оба пучка сводились в одной точке образца, который помещался в специальную вставку для конденсации изотопа гелия ^3He , и которая, в свою очередь, находилась внутри гелиевого криостата с соленоидом с изменяемым магнитным полем в диапазоне от 0 до 10 Тл. Конструкция вставки позволяла плавно менять температуру в диапазоне от 0.6 К до 15 К. Держатель образца внутри вставки содержал оптическое окно, через которое заводилось лазерное фотовозбуждение к изучаемому образцу и собирался полезный сигнал. Исследуемый образец монтировался в держателе таким образом, что наклон плоскости квантовой ямы к направлению вектора магнитной индукции составлял 90 градусов. Регистрация сигнала фото-отражения производилась с помощью быстрого фотодиода, сопряженного с системой счета фотонов.

Ранее нами была обнаружена линия в спектре фотоотражения лафлиновского состояния двумерных электронов ($\nu=1/3$), возникающая при температуре ниже 1 К, связанная с формированием сверхдолгоживущих (более 10 с) нейтральных возбуждений с нулевым импульсом (спин-магнитогравитонов) в лафлиновской жидкости [1]. В представленном эксперименте изучалась временная динамика интенсивности этой линии, возбуждаемой зондирующим полупроводниковым лазером, в зависимости от плотности мощности второго лазера накачки, в диапазоне открытия механического затвора от 0.0025 до 1000 секунд.

[1] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozerov, A. B. Vankov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin & V. Y. Umansky, Nature Commun. 12, 6477 (2021).

[2] А. В. Ларионов, А. С. Журавлев, Л. В. Кулик, А. А. Загитова, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ 120, вып. 6, с. 451 – 456 (2024).

Критическая температура псевдоспинового ферромагнитного фазового перехода вблизи фактора заполнения $\nu = 2$

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

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000,
Москва, ул. Мясницкая, 20

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

**lopatina@issp.ac.ru*

Исследование многокомпонентных двумерных электронных систем (ДЭС) — например, многодолинных полупроводников — открывает возможность описания множества необычных зарядовых и спиновых состояний. При изучении таких систем принято вводить дополнительную степень свободы, маркирующую состояние электрона и называемую псевдоспином. Аналогия между спином и псевдоспином позволяет предсказать возникновение сильных корреляционных эффектов, таких как псевдоспиновый ферромагнетизм в условиях квантового эффекта Холла, Стоунеровские переходы с переключением псевдоспиновой поляризации, вызванные электрон-электронным взаимодействием, возникновение долинных скирмионов.

Одной из наиболее перспективных систем для изучения подобных сильно коррелированных состояний является широкая квантовая яма AlAs, выращенная вдоль оси [001]. В таких структурах нижайшими по энергии оказываются эквивалентные X- и Y-долины, ориентированные вдоль направлений [100] и [010], соответственно. Кроме долинной структуры, обеспечивающей дополнительную степень свободы, важную роль играет большая эффективная масса электронов в AlAs, составляющая около половины массы свободного электрона. Благодаря этому энергия электрон-электронного взаимодействия существенно превышает кинетическую энергию, что усиливает коллективные эффекты.

В недавнем исследовании [1] был обнаружен фазовый переход вблизи фактора заполнения 2. С помощью спинового резонанса удалось установить, что этот переход сопровождается макроскопическим изменением псевдоспиновой поляризации. Вблизи перехода в продольном сопротивлении наблюдается аномалия: локальный рост сопротивления вблизи минимума фактора заполнения 2. Это явление связывают с образованием доменов с различной псевдоспиновой поляризацией, а рост сопротивления объясняется увеличением рассеяния на границах между доменами.

В данной работе с помощью ЭПР спектроскопии и транспортных измерений исследована температурная зависимость псевдоспиновой поляризации в интервале 0.5–1.4 К. Определена температура Кюри, при которой разрушаются доменные стенки. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями для аналогичных систем [2].

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

Литература

- [1] A. V. Shchepetilnikov, A. R. Khisameeva, S. A. Andreeva et al. // Phys. Rev. Lett. 133, 096301 (2024).
- [2] T. Jungwirth, A. H. MacDonald // Phys. Rev. Lett. 87, 216801 (2001).

Дробный квантовый эффект Холла со знаменателем четыре в одиночных ямах GaAs с двухслойными электронными системами

С.И. Дорожкин,* А.А. Капустин

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

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

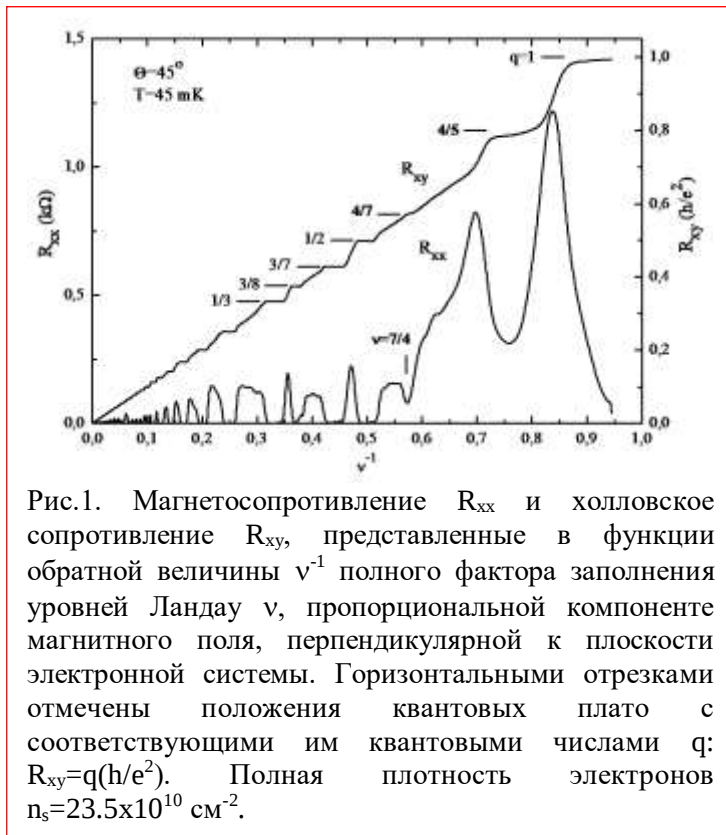


Рис.1. Магнетосопротивление R_{xx} и холловское сопротивление R_{xy} , представленные в функции обратной величины ν^{-1} полного фактора заполнения уровней Ландау ν , пропорциональной компоненте магнитного поля, перпендикулярной к плоскости электронной системы. Горизонтальными отрезками отмечены положения квантовых плато с соответствующими им квантовыми числами q : $R_{xy} = q(h/e^2)$. Полная плотность электронов $n_s = 23.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

В докладе будут представлены результаты наблюдения состояний дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ) на факторах заполнения $5/4$ и $7/4$, имеющих четные знаменатели. Эффект обнаружен в электронных системах, образуемых двумя слоями электронов с различной плотностью, расположенных в одиночной квантовой яме GaAs шириной 60 нм, при отклонении магнитного поля от нормали к плоскости системы. Исследования выполнены магнетотранспортными и магнетоемкостными методами в криостате с откачкой паров ^3He при температуре 0.5 К и возможностью плавного изменения угла Θ между нормалью и магнитным полем [1], а также в криостате растворения ^3He в ^4He .

при температуре $T = 45 \text{ мК}$ и угле $\Theta = 45^\circ$ (см. рис.). Эффект наблюдается в условиях большой разности плотностей электронов в слоях. Предположительно причиной возникновения таких состояний ДКЭХ является особенность межслоевых электрон-электронных корреляций в условиях, когда ближайшими соседями электронов слоя меньшей плотности являются электроны другого слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 24-22-00312.

Литература

[1] С.И. Дорожкин, А.А. Капустин, И.Б. Федоров, В. Уманский, Ю.Х. Смет, Письма в ЖЭТФ 117, 72 (2023).

Магнитоэкситонный конденсат в квантово-холловском диэлектрике: растекание и когерентность

А.В. Горбунов,* А.В. Ларионов, Л.В. Кулик

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

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

Триплетные циклотронные магнитоэкситоны (ТЦМЭ) в квантово-холловском диэлектрике (фактор заполнения $\nu = 2$) образованы неравновесной электронной вакансией (ферми-дыркой) на полностью заполненном нулевом электронном уровне Ландау и возбужденным электроном с перевернутым спином на пустом первом уровне Ландау [1, 2]. ТЦМЭ – это низайшие по энергии возбуждения [2], представляющие собой композитные бозоны со спином $S = 1$. В квантовой яме GaAs/AlGaAs с подвижностью $1.5 \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ время жизни ТЦМЭ достигает 1 мс [3]. При температуре $T \lesssim 1 \text{ К}$ и концентрации $n_{\text{ex}} \sim (1 - 10)\%$ от плотности квантов магнитного потока в ансамбле ТЦМЭ формируется новое состояние электронной материи – магнитоэкситонный конденсат (МЭК) [4] – экспериментальный пример конденсации композитных бозонов в пространстве обобщенных импульсов q . Свойства такого конденсата весьма необычны. Недавние эксперименты по выяснению фазовой диаграммы перехода «экситонный газ – конденсат» в диапазоне $0.04 \lesssim T \lesssim 0.65 \text{ К}$ показали, что на границе перехода n_{ex} не меняется с температурой – МЭК ведет себя как несжимаемая жидкость [4].

ТЦМЭ – «темные» квазичастицы, не взаимодействующие с электромагнитным полем в дипольном приближении, и основной способ их обнаружения – фотоиндуцированное резонансное отражение (ФРО) света, соответствующего оптическому переходу «0–0» между состояниями нулевых уровней Ландау тяжелой дырки в валентной зоне и электрона в зоне проводимости. Методом ФРО детектируются неравновесные ферми-дырки, входящие в состав ТЦМЭ. Именно так удалось обнаружить удивительную способность МЭК растекаться из области фотовозбуждения на макроскопические расстояния [3]. Особенностью ТЦМЭ является то, что минимум их дисперсионной зависимости находится не при $q = 0$, а в роторном минимуме, вблизи $q_{\text{min}} \simeq 1/l_B$. Согласно полученным ранее экспериментальным результатам, сложилось представление, что ансамбль ТЦМЭ в холловском диэлектрике состоит из экситонного газа с обобщенными импульсами $q \sim 0$ и МЭК в роторном минимуме. Именно последние осуществляют быстрый перенос экситонной плотности на большие расстояния. Использование в экспериментах проекционной оптической системы с высоким пространственным разрешением и прецизионная подстройка в резонанс при регистрации сигнала ФРО обнаруживают качественно новые особенности и более сложную картину растекания ТЦМЭ. В нашем случае магнитная длина $l_B = \sqrt{\hbar c / eB} \simeq 10^{-6} \text{ см}$, т.е. для релаксации нужно отдать довольно большой импульс. Релаксация фотовозбужденных ТЦМЭ в роторный минимум (стохастизация) происходит довольно медленно. В результате они непрерывно заполняют весь промежуток между $q = 0$ и $q \simeq 1/l_B$, а в спектре ФРО могут наблюдаться более двух резонансов. Способность к растеканию и когерентные свойства ТЦМЭ в этих состояниях различны.

Литература

- [1] M. A. Eriksson, A. Pinczuk, B. S. Dennis et al., Phys. Rev. Lett. 82, 2163 (1999).
- [2] L.V. Kulik, I.V. Kukushkin, S. Dickmann et al., Phys. Rev. B 72, 073304 (2005).
- [3] L.V. Kulik, A.S. Zhuravlev, S. Dickmann et al., Nature Commun. 7, 13499 (2016).
- [4] A.S. Koreyev, P.S. Berezhnoy, A.V. Gorbunov et al., Phys. Rev. B 110, 165417 (2024).

Экранирование экситонных состояний в лафлиновских и джейновских жидкостях

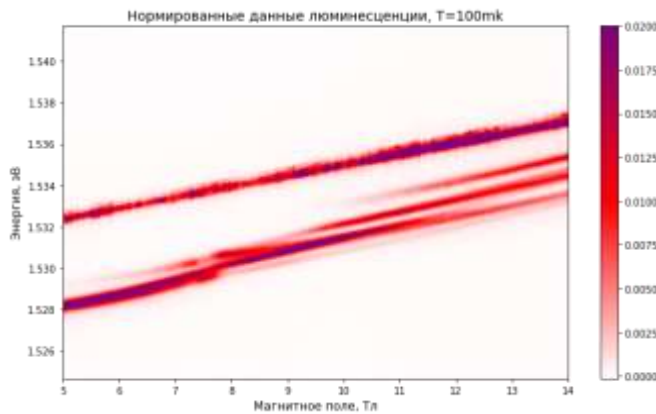
Д.А. Щигарев,^{1*} А.В. Ларионов,² Л.В. Кулик²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

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

*e-mail: dima.shigarev@yandex.ru

Исследовались оптические свойства экситонных состояний в лафлиновской и джейновской жидкостях в режиме дробного квантового эффекта Холла. Лафлиновские состояния реализуются при факторе заполнения $\nu = 1/p$, в то время как джейновские соответствуют заполнению $\nu = p/(2p + 1)$ где p — целое число.



В экспериментах измерялась резонансная фотолюминесценция[1,4] в образце GaAs/AlGaAs с шириной квантовой ямы 17 нм, концентрацией электронов $n_e = 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ подвижностью $\mu = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(B \cdot \text{с})$. Измерения проводились в диапазоне температур $T = 40\text{--}1500 \text{ мК}$ в магнитных полях до 14Тл. Спектры фотолюминесценции регистрировались как функция интенсивности спектральных компонент в зависимости от поля. На рисунке приведён типичный спектр

резонансной фотолюминесценции в координатах магнитное поле - энергия. Верхняя линия — это резонансная накачка системы.

Показано, что формирование коррелированных электронных состояний приводит к эффективному экранированию случайного потенциала, обусловленного легированием (остаточные примеси в барьерах) и шероховатостью интерфейсов квантовой ямы. Это экранирование существенно увеличивает когерентный объём [3] магнитоэкситонов [2], что в свою очередь усиливает их взаимодействие со светом. Наблюдается значительное усиление интенсивности сигнала фотолюминесценции при переходе в коррелированные состояния по сравнению с некогерентным фоном.

Литература

- [1] Л. В. Кулик, А. С. Журавлев, Е. И. Белозеров, В. А. Кузнецов, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, 112:8 (2020).
- [2] L. V. Kulik, A. I. Tartakovski, A. V. Larionov, E. S. Borovitskaya, and V. D. Kulakovski, Zh. E' ksp. Teor. Fiz. 112, 353–361 (1997).
- [3] А. В. Горбунов, А. В. Ларионов, Л. В. Кулик, В. Б. Тимофеев, Письма в ЖЭТФ, 2021, том 114, выпуск 7, 479–485.
- [4] А. С. Журавлев, Л. В. Кулик, Л. И. Мусина, Е. И. Белозеров, А. А. Загитова, И. В. Кукушкин, Письма в ЖЭТФ, 2021, том 114, выпуск 7, 474–478.

Изучение спиновых свойств двумерной системы в сильном магнитном поле методом поляризованной люминесценции

П.С. Бережной,^{1,2*} А.С. Кореев,¹ А.Б. Ваньков,^{1,2} В.В. Соловьев¹

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

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

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

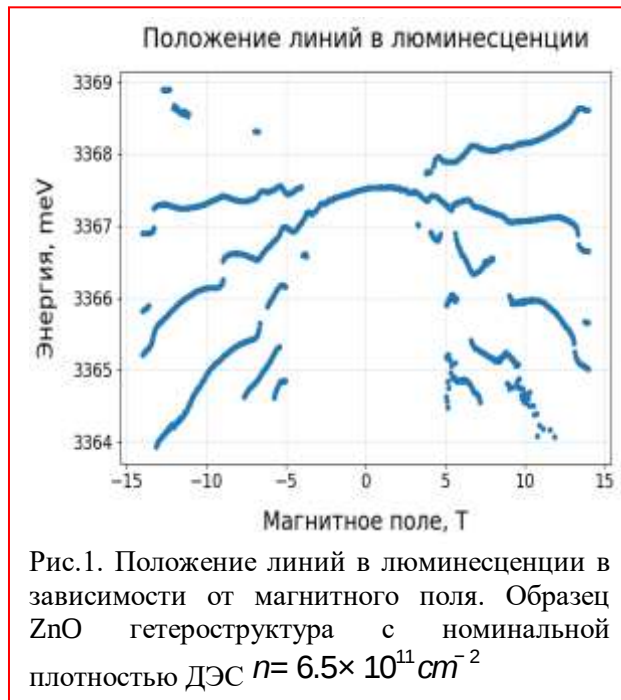


Рис.1. Положение линий в люминесценции в зависимости от магнитного поля. Образец ZnO гетероструктура с номинальной плотностью ДЭС $n = 6.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Изучение квантового эффекта Холла в двумерных электронных системах занимает важное место в физике конденсированных сред. Квантовый эффект Холла проявляется в возникновении квантованных плато проводимости при сильных магнитных полях и низких температурах и связан с формированием уровней Ландау. Даже в целочисленном режиме большое значение имеют корреляционные эффекты и взаимодействие между электронами, которые существенно влияют на свойства системы.

В работе [1] было показано, что люминесценция двумерных структур на основе ZnO обусловлена рекомбинацией электронов и дырок между различными энергетическими зонами, при этом зависимость спектра от магнитного поля

проявляет характерные особенности с $1/B$ периодичностью.

В настоящей работе изучается нижайшая по энергии полоса люминесценции, поскольку именно она наиболее чувствительна к свойствам двумерной электронной системы (ДЭС). Исследование проведено на ряде образцов с различной плотностью ДЭС, в различных поляризациях и при разных углах наклона магнитного поля.

Известно, что в образцах ZnO с высокой плотностью электронов наблюдается типичный веер уровней Ландау, тогда как при низкой плотности появляются лишь одна или две линии (в зависимости от угла наклона). Мы подробно изучили структуру люминесцентных линий в образцах со средней и низкой плотностью, исследовали их в разных поляризациях и обнаружили, что расщепление между линиями демонстрирует сложную, нелинейную зависимость от магнитного поля. Кроме того, нами был зафиксирован ферромагнитный переход вблизи определённого значения магнитного поля.

Полученные результаты дополняют представления о влиянии электрон-электронного взаимодействия на энергетический спектр гетероструктур ZnO и расширяют возможности наблюдения подобных эффектов.

Литература

[1] V. V. Solovyev et al, Optical probing of MgZnO/ZnO heterointerface confinement potential energy levels, Applied Physics Letters 106, 082102 (2015).

Аномальное поведение резонансного отражения вблизи $\nu = 1$ как индикатор нетривиальной спиновой поляризации в двумерной электронной системе

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

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

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20*

Спиновая поляризация в сильнокоррелированных двумерных электронных системах остаётся одним из центральных объектов исследования в физике конденсированного состояния. В системах, реализуемых в режиме квантового эффекта Холла, корреляционные и обменные взаимодействия формируют богатую палитру коллективных фаз, включая экзотические структуры типа скирмионов. Спиновая поляризация служит важным маркером внутренней структуры основного состояния и позволяет диагностировать переходы между фазами. Особенно актуальны прямые экспериментальные методы зондирования спинового порядка, способные работать в широком диапазоне плотностей носителей и магнитных полей.

В данной работе был использован один из таких методов – спектроскопия резонансного отражения, обладающая высокой чувствительностью к спиновым степеням свободы и позволяющая получать информацию о механизмах спиновой переориентации и коллективных возбуждениях в ДЭС [1]. Низкотемпературные эксперименты проводились на гетероструктуре MgZnO/ZnO с концентрацией электронов в двумерном канале равной $2.85 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

В результате была обнаружена аномалия в виде появления дополнительного максимума интенсивности отражения в окрестности фактора заполнения $\nu = 1$ (рис. 1). Это

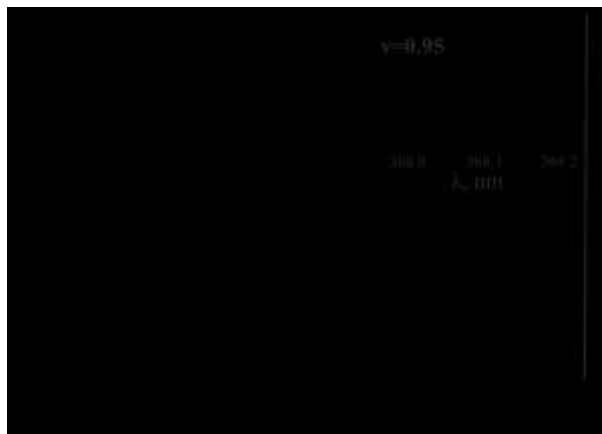


Рис.1. Зависимость положения максимума резонансного отражения от фактора заполнения. На вставке пример проявления дополнительного пика интенсивности резонансного отражения.

свидетельствует о нетривиальной спиновой поляризации в этой области. Отсутствие симметрии по фактору заполнения относительно $\nu = 1$ указывает на наличие коллективных эффектов.

Ключевая информация о спиновой структуре может содержаться в форме и энергетическом масштабе верхней ветви на рис. 1. Дальнейшие измерения с подробным изучением поведения резонансного отражения в этом диапазоне должно прояснить происхождение наблюдаемой аномалии.

Литература

- [1] L. V. Kulik, K. Ovchinnikov, A. S. Zhuravlev, V. E. Bisti, I. V. Kukushkin, S. Schmult, and W. Dietsche, Phys. Rev. B 85, 113403 (2012).

Динамика двумерных экситон-поляритонных систем, резонансно возбуждаемых в квадратных мезах высокочастотных микрорезонаторов

А.А. Деменив,* Н.Н. Ипатов, С.С. Гаврилов, В.Д. Кулаковский

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

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

В теоретической работе [1] было показано, что в однородной двумерной системе экситонных поляритонов в мезах планарного микрорезонатора (МР) с пониженной вращательной симметрией может существовать область плотностей возбуждения, при которых возникает параметрическое рассеяние из возбуждаемого состояния нижнего поляритона (НП) с $k=0$ и переходом системы на стабильную промежуточную ветвь устойчивости. В данной работе исследован отклик НП системы в мезе квадратного сечения (60×60 мкм²) в области промежуточной ветви устойчивости на резонансную когерентную лазерную накачку с $\hbar\omega_p = E_{lp}(k=0) + \Delta$, с положительной отстройкой $\Delta \gg \gamma$ (декремент затухания в МР), по нормали к плоскости МР.

Было найдено, что в мезах, при увеличении плотности возбуждения выше пороговой P^* , может возникать сильное рассеяние из накачки в 4 области k -пространства вблизи НП состояний с $k = (2m_p\Delta)^{0.5}/\hbar$ на осях $0x$ и $0y$, ортогональных сторонам мезы. На основе сравнения с экспериментом была развита модель многомодового параметрического НП осциллятора с дискретным набором собственных энергий для квадратных мез. Показано, что в отличие от планарных МР, изменение отстройки накачки Δ может кардинально менять функцию отклика поляритонной системы в мезе. Из рис.1 видно, что при различных Δ в динамике отклика НП системы выше P^* может наблюдаться как переход на промежуточную ветвь устойчивости с формированием стационарного состояния с инверсной населенностью ($I^* \gg I_0$), так и отсутствие существенных изменений, когда система продолжает находиться на нижней устойчивой ветви. Таким образом, уже в больших мезах высокочастотных МР возникает параметризация (по Δ) отклика поляритонной системы на резонансную накачку.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

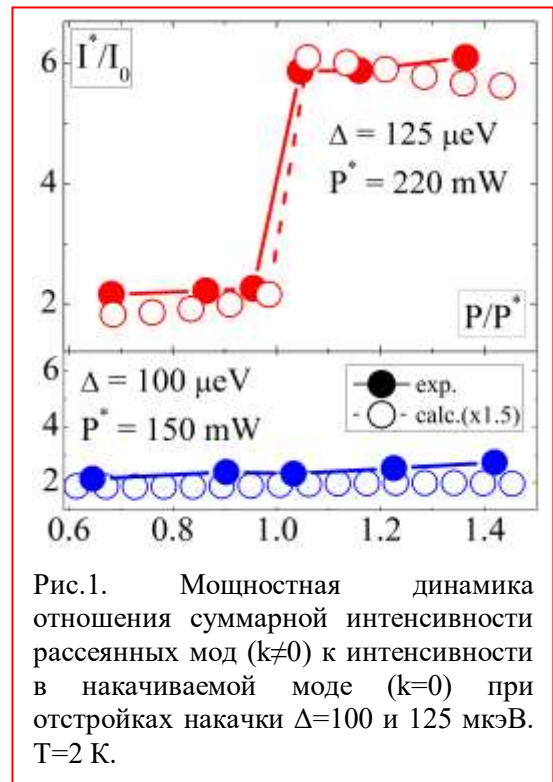


Рис.1. Мощностная динамика отношения суммарной интенсивности рассеянных мод ($k \neq 0$) к интенсивности в накачиваемой моде ($k=0$) при отстройках накачки $\Delta=100$ и 125 мкэВ. $T=2$ К.

Литература

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

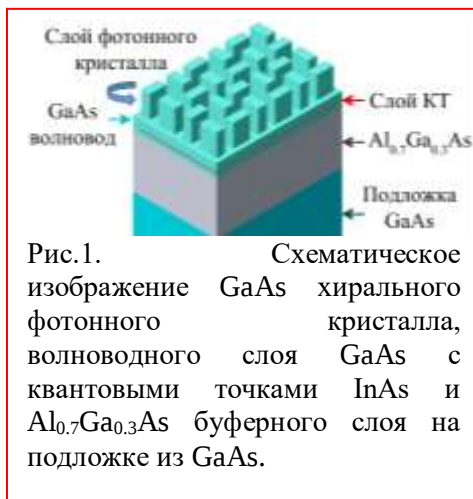
Дисперсия электромагнитных мод в полупроводниковых наноструктурах с хиральными фотонными кристаллами

А.А. Максимов,* И.И. Тартаковский

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

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

В настоящее время полупроводниковые нанотехнологии позволяют создавать искусственные материалы: фотонные кристаллы, микрорезонаторы, волноводные структуры, метаматериалы с весьма необычными оптическими свойствами. Спонтанное излучение таких структур, его интенсивность, направленность и степень поляризации зависит от локальной плотности электромагнитных мод в самой структуре, которой можно управлять на стадии изготовления. Наноструктуры на основе обычных ахиральных A^3B^5



полупроводников, в которых неэквивалентность право- и лево-поляризованных электромагнитных мод возникает из-за общей хиральной симметрии системы, могут быть использованы для создания компактных источников циркулярно поляризованного излучения без приложения внешнего магнитного поля, при чем оптическая активность таких материалов может значительно превышать оптическую активность естественных хиральных материалов.

Были подробно экспериментально исследованы спектральные поляризационные и пространственные свойства излучения слоя InAs квантовых точек, внедренных в высокодобротные микрорезонаторы и планарные волноводные структуры на основе GaAs. На верхнем слое полупроводниковых гетероструктур путем травления на определенную глубину изготавливались квадратные решетки фотонных кристаллов из периодически расположенных различных фигур, из которых состояла элементарная ячейка кристалла с хиральной симметрией. На рис. 1 показано схематическое изображение части планарной волноводной структуры на основе GaAs и хирального фотонного кристалла с элементарной ячейкой из 4-х вытянутых прямоугольников, повернутых на 90° относительно друг друга. Известно, что при оптическом возбуждении подобных наноструктур степень циркулярной поляризации полос излучения их фотолюминесценции может достигать значений очень близких к 1 в нулевом магнитном поле.

В докладе обсуждается подробно экспериментально изученная дисперсия фотонных мод при исследованиях углового распределения излучения в микрорезонаторных и волноводных гетероструктурах. Продемонстрировано, что вблизи брэгговских резонансов возможно описание дисперсии электромагнитных фотонных мод с помощью простых аналитических выражений.

Изучены также спектры пропускания циркулярно-поляризованного света через планарные волноводные структуры с фотонными кристаллами с различными периодами и различным знаком хиральности. Показано, что спектры пропускания зависят от поляризации падающего и проходящего света и определяются знаком хиральности структуры.

Особенности оптического отклика латерально ограниченной экситон-поляритонной системы

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

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

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

Квазидвумерные экситонные поляритоны – составные бозе-частицы, возникающие в полупроводниковых микрорезонаторах благодаря сильному экситон-фотонному взаимодействию. Если частота накачки находится чуть выше собственного уровня поляритонов, нелинейность, обусловленная поляритон-поляритонным взаимодействием, приводит к эффекту бистабильности [1]. В этом случае отклик поляритонов на резонансную световую волну имеет S-образный вид с двумя ветвями устойчивости. При достижении критического значения плотности возбуждения f в такой системе наблюдается переход с нижней на верхнюю ветвь устойчивости, на которой отстройка от резонанса целиком компенсирована сдвигом собственной частоты, вызванным взаимодействием поляритонов. В латерально ограниченных системах рэлеевское рассеяние поляритонов может приводить к появлению новой промежуточной ветви отклика [2].

Нами был теоретически исследован оптический отклик одномерной латерально ограниченной поляритонной системы размером 60 мкм, в которой возбуждаются сразу несколько размерно-квантованных мод. По причине нелинейности каждая мода с ростом f может испытать неравновесный переход, связанный с оптической бистабильностью. Установлено, что характер отклика системы с ростом f существенно зависит от положения частоты накачки E_p относительно уровней размерного квантования. В частности, если E_p находится чуть выше уровня одной из симметричных размерно-квантованных мод E_{2n+1} с $n > 0$, то при увеличении f эта мода демонстрирует бистабильное поведение, которое приводит к переходу поляритонной системы на промежуточную ветвь отклика. При дальнейшем увеличении f данное состояние теряет устойчивость из-за взаимодействия поляритонов на разных уровнях размерного квантования. Последнее обстоятельство может приводить к возникновению в поляритонной системе автоколебаний и хаоса, аналогичных наблюдаемым в круглой мезе [3]. Дальнейшее увеличение f вызывает переход поляритонной системы на верхнюю ветвь устойчивости с доминирующим вкладом основной моды E_1 . С другой стороны, в случае резонансной накачки мод E_{2n+1} на их красном краю усиление этих мод не происходит в силу отрицательной обратной связи между их фиолетовым сдвигом и плотностью, поэтому поведение поляритонной системы в мезе остается аналогичным ее поведению в однородном планарном микрорезонаторе.

Литература

- [1] A. Baas et al., Phys. Rev. A 69, 023809 (2004)
- [2] S.S. Gavrilov, Phys. Rev. B. 103, 184304 (2021).
- [3] N. N. Ipatov, S.S. Gavrilov, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 89, No. 2, 265–270 (2025)

Многочастичные комплексы в инкапсулированных монослоях дихалькогенидов переходных металлов

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

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

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

Изучалась люминесценция структур, состоящих из монослоев дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), инкапсулированных гексагональным нитридом бора hBN, при нерезонансном фотовозбуждении электронно-дырочных пар в монослоях. Вследствие туннелирования электронов с донорных примесей из окружающих слоев hBN в монослоях имеются двумерные электроны, образующие ферми-газ и частично локализованные, в окружающих монослой слоях hBN - положительно заряженные примеси. Также экспериментально имеется возможность изменять концентрацию двумерных электронов при приложении напряжения к слою при наличии электрических контактов. При стационарном возбуждении в системе в динамическом равновесии с электронами и дырками существуют свободные экситоны и различные многочастичные комплексы (свободные трионы, экситоны и трионы, локализованные на примесях в слое и в барьере hBN.) В спектрах люминесценции различаются две линии, интерпретируемые обычно как линии экситона и триона (или экситон-полярона, что при низких концентрациях свободных электронов эквивалентно). Наблюдаемые линии сдвигаются при изменении температуры, накачки и электронной концентрации. Энергии экситонов в слоях ДПМ определены экспериментально, существуют хорошо разработанные методы расчета, согласующиеся с экспериментальными значениями [1-3]. Для расчета энергии трионов используются разные методы (вариационные, ферми-поляронный подход с использованием диаграммной техники, использование модельных потенциалов), однако вопрос еще не закрыт. В данной работе рассчитывались энергии связи трионов и экситонов, локализованных на заряженных примесях, для взаимодействия, рассматриваемого на больших расстояниях как диполь-зарядное, а на малых аппроксимируемого различными способами [4-6]. Поляризуемость экситонов в монослоях ДПМ сильно зависит как от материала монослоя, так и диэлектрического окружения, и величина ее в общем случае не определена. Проводимые расчеты и эксперименты сравнивались между собой, что позволило оценить экситонную поляризуемость. Также можно выделить наиболее реалистичную аппроксимацию диполь-зарядного взаимодействия на малых расстояниях.

Литература

- [1] М. В. Дурнев, М. М. Глазов. УФН 188, 913 (2018).
- [2] B. Han, C. Robert, E. Courtade, M. Manca et al. Phys. Rev. X8, 031073 (2018).
- [3] Г. М. Голышков, А. С. Бричкин, В. Е. Бисти, А. В. Черненко. Письма в ЖЭТФ 120, 279 (2024).
- [4] Ю. Е. Лозовик, М.В. Никитков. ЖЭТФ 111, 1107 (1997).
- [5] D. K. Efimkin, E. K. Laird, J. Levinsen, M. M. Parish, and A. H. MacDonald, Phys. Rev. B103, 175417 (2021).
- [6] C. Fey, P. Schmelcher, A.c Imamoglu, and R. Schmidt, Phys. Rev. B101, 195417 (2020).

Эффект Штарка в монослоях ДПМ, инкапсулированных hBN

А.В. Черненко,* А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, В.Е. Бисти*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: chernen@issp.ac.ru*

Экситоны определяют оптические свойства структур с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) так как их энергия связи достигает нескольких сотен мэВ, что позволяет наблюдать экситонные эффекты вплоть до комнатной температуры [1]. Присутствие свободных носителей заряда приводит к появлению дополнительной линии в спектре фотолюминесценции (ФЛ), приписываемой заряженным экситонам. Вертикальное электрическое поле является эффективным инструментом управления плотностью носителей заряда в монослоях, что позволяет исследовать их влияние на спектры. Кроме того, оно поляризует экситонные состояния, приводя к штарковскому сдвигу, модифицирует энергию связи нейтральных и заряженных экситонов. Для изучения этого влияния методом эксфолиации и последовательно переноса были сделаны структуры Graphene-hBN-MoSe₂-hBN-Graphite и Graphene-hBN-WSe₂-MoSe₂-hBN-Graphite на подложке Si/SiO₂. Металлические контакты Gr(50 нм)\Au(250 нм) для приложения вертикального поля были получены термическим напылением.

Кроме наблюдения штарковского сдвига основного состояния экситона (см. Рис.1), изменение плотности электронов в монослое при приложении вертикального поля можно отследить по изменению энергетического расстояния между линиями ФЛ экситонов и трионов, которое меняется пропорционально ферми-энергии электронов, которая, в свою очередь, зависит от величины вертикального поля. Причиной этой зависимости является так называемый «эффект отдачи» при рекомбинации триона, который для соблюдения законов сохранения энергии и квазиимпульса, должен иметь квазиимпульс, равный фермиевскому. Из зависимости расщепления линий экситона и триона от V_g $E_{T-X}(V_g)$ можно получить изменение Ферми энергии электронного газа, которое оказалось равным 5 мэВ при изменении величины поля от -250 ($V_g = -6$ В) до 250 ($V_g = 6$ В) кВ/см². Концентрация электронов в монослое при этом изменяется на величину $\sim 5 \times 10^{11}$ см⁻².

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

Литература

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

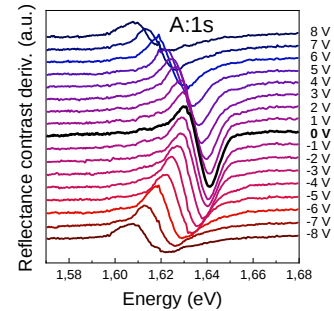


Рис.1 Спектры отражения структуры nGr-hBN-MoSe₂-hBN-nGr при различных значениях приложенного напряжения V_g . Накачка лазером $\lambda = 532$ нм,

Дислокации и междоменные межслоевые упругие волны в релаксированных сверхрешетках муара

В.В. Еналдиев^{1,2*}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7

*e-mail: vova.enaldiev@gmail.com

Под действием сил межслоевой адгезии длиннопериодные сверхрешетки муара, возникающие на интерфейсе двумерных материалов с малым разворотом кристаллографических направлений, релаксируют в массив доменов, разделенных сетью дислокаций [1,2]. В бислоях дихалькогенидов переходных металлов, ромбоэдрические домены приобретают спонтанный электрический дипольный момент, направленный перпендикулярно плоскости слоев [3], а их реполяризация в электрическом поле определяется движением (изгибом и скольжением) частичных дислокаций [3,4,5], характеризуемым ориентационной зависимостью энергии на единицу длины частичной дислокации.

В своем докладе я представлю теорию [6], описывающую частичные и полные дислокации в релаксированных сверхрешетках муара, образованных на межслоевом интерфейсе в бислоях двумерных материалов вблизи параллельного и антипараллельного выравнивания слоев. В рамках общей модели для энергии межслоевой адгезии получено точное аналитическое выражение для поля смещений, описывающего индивидуальную частичную дислокацию и определены аналитические ориентационные зависимости ширины и энергии на единицу длины частичной дислокации. Для полной дислокации в антипараллельных бислоях получено полуаналитическое выражение для поля смещений, которое позволяет сделать аналитическую оценку ширины дислокации и её энергии на единицу длины.

Также будет показано, что возникновение сети дислокаций порождает новый тип одномерных упругих волн в релаксированных сверхрешетках муара, которые могут свободно распространяться вдоль дислокационных линий, оставаясь локализованными в поперечном направлении в области между доменами [7]. При этом индивидуальная частичная/полная дислокация порождает серию подзон междоменных упругих волн (одну бесщелевую и одну или несколько щелевых), частоты которых лежат ниже континуума межслоевых упругих волн в доменах. Бесщелевая мода характеризуется мнимыми частотами в интервале волновых векторов $q < q_c$, где значение критического волнового вектора, q_c , определяемое пересечением закона дисперсии с нулевой частотой, зависит от материала и ориентации дислокации. Такая дисперсия указывает на неустойчивость прямых дислокаций с длиной, превышающей $2\pi/q_c$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №24-72-10015.

Литература

- [1] A. Weston Y. Zou, V. Enaldiev et al., Nature Nanotechnology, 15, 592 (2020).
- [2] V.V. Enaldiev et al., Phys. Rev. Letters, 124, 206101 (2020).
- [3] A. Weston, E.G. Castanon, V.V. Enaliev et al., Nature Nanotechnology, 17, 390 (2022).
- [4] V.V. Enaldiev, F. Ferreira, V.I. Fal'ko, Nano Letters 22, 1534 (2022).
- [5] K. Ko et al., Nature Materials, 22, 992 (2023).
- [6] V.V. Enaldiev, 2D Materials, 11, 035014 (2024).
- [7] V.V. Enaldiev, 2D Materials 12, 021001 (2025).

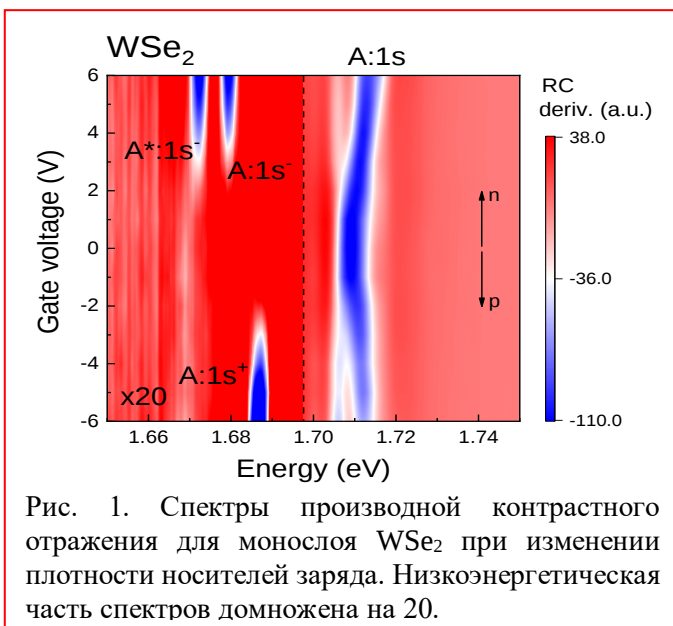
Экситонные состояния в гетероструктурах с монослоями MoSe_2 и WSe_2 при изменении зарядовой плотности

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

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

**e-mail: golyshkov.gm@issp.ac.ru*

Гетероструктуры на основе монослоев дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляют собой новый класс материалов, привлекающий внимание как перспективный объект для фундаментальных исследований, а также для создания на их основе разнообразных оптоэлектронных устройств. Энергия связи экситона в монослоях ДПМ



достигает несколько сотен мэВ [1]. Инкапсулирование монослоев ДПМ гексагональным нитридом бора (hBN) приводит к значительному сужению экситонных линий ввиду уменьшения неоднородного уширения связанного с подложкой, а также изоляции монослоев от воздействия атмосферы. Особый фундаментальный интерес представляет взаимодействие экситонов с ферми-морем свободных носителей заряда. Наличие проводящих графеновых контактов в гетероструктуре дает возможность управления зарядовой плотностью в монослое, что приводит к разнообразным деталям спектров экситонов [2]. Большой интерес

представляет наблюдение возбужденных экситонных состояний методом спектроскопии отражения. В подобных структурах при приложении электрического поля в монослое изменяется концентрация свободных носителей заряда, что приводит к появлению в спектре контрастного отражения особенностей ниже по энергии основного экситонного состояния $A:1s$, связанных с заряженными экситонными состояниями (рис. 1). Они обозначены знаком заряда свободных носителей «+» или «-». В случае электронного легирования ($V > 0$ на рис.1) монослоя WSe_2 наблюдается дублет, связанный с особенностью формирования заряженного экситона. Основной экситонный резонанс испытывает характерный симметричный по полю сдвиг. Наведенная плотность оценивается из изменения расщепления между состояниями $A:1s$ и $A:1s^{+/-}$. Похожие особенности возникают и для возбужденного экситонного состояния $A:2s$ как при электронном, так и при дырочном легировании, что является несомненным достижением.

Литература

- [1]. G. Wang, A. Chernikov, M. Glazov et al. Rev. Mod. Phys. 90, 021001 (2018).
- [2]. K. Wagner, E. Wietek, J. D. Ziegler et al. Phys. Rev. Lett. 125, 267401 (2020).

Микроволновая спектроскопия слоистых материальных систем на основе графена в режиме квантового эффекта Холла

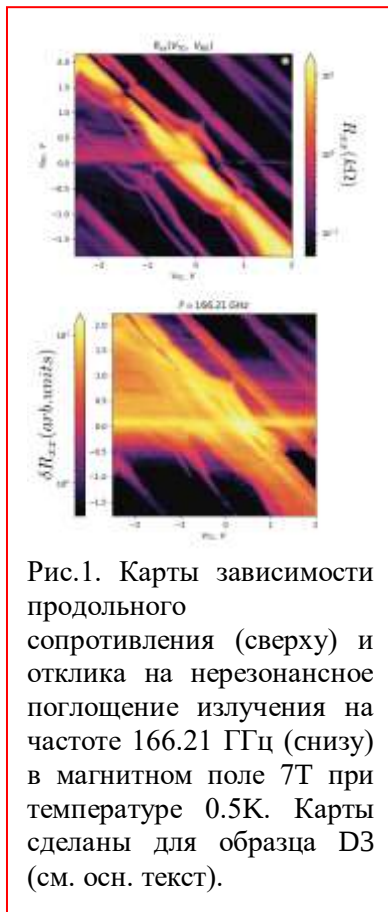
**Г.А. Николаев,^{1,2*} Т.М. Курбанов,^{1,2} С.А. Андреева,^{3,1} О.В. Орлов,^{1,2}
А.В. Щепетильников,¹ И.В. Кукушкин¹**

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

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

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

*e-mail: nikolaevgk@gmail.com



В данной работе исследуется нерезонансный отклик двумерных электронных и дырочных систем на суб-ТГц излучение, реализованных в структурах на основе слоистых материалов. Эксперимент проводился в криостате с жидким гелием-3 при температуре порядка 0,5 К в режиме квантового эффекта Холла. С использованием методики двойного синхронного усиления анализировался сигнал добавки к сопротивлению, обусловленный нерезонансным поглощением излучения.

Объектом исследования являлась двумерная система, реализованная в структуре из двух слоёв графена, вблизи которой располагались три слоя дихалькогенида переходного металла MoTe_2 (образец D3). В качестве затворов используется графит, что позволяет эффективно управлять концентрацией носителей заряда и шириной запрещённой зоны [1]. Интерес к данной системе обусловлен тем, что, как предполагается, за счёт эффекта близости дихалькогенида переходного металла спин-орбитальное взаимодействие в электронной системе значительно усиливается [2], что повышает вероятность индуцировать спиновый резонанс. Кроме того, в подобных системах на основе двухслойного графена наблюдаются экзотические структуры пересечения уровней Ландау. Мы также зафиксировали их проявления как в зависимости сопротивления от напряжений на затворах, так и в отклике на суб-ТГц излучение (см. рис. 1).

Литература

- [1] Zhang, Y., Tang, T. T., Girit, C., Hao, Z., Martin, M. C., Zettl, A., ... & Wang, F., Direct observation of a widely tunable bandgap in bilayer graphene, *Nature*, 459(7248), 820-823 (2009).
- [2] Gmitra M., Fabian J. Proximity effects in bilayer graphene on monolayer WSe 2: Field-effect spin valley locking, spin-orbit valve, and spin transistor, *Physical review letters*, 119(14), 146401 (2017).

Разработка аптамерной тест-полоски на основе ПЭТФ мембраны

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

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

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

*e-mail: daria.tikhonova@chemistry.msu.ru

Одним из популярных применений полимерных мембран являются хроматографические тест-полоски. Засчет возможностей осуществления биофункционализации поверхности ПЭТФ (полиэтилентерефталатной) мембраны в таких подходах в качестве узнающих элементов также активно применяются аптамеры. Эти однопечечные синтетические нуклеиновые кислоты способны высокоаффинно и высокоспецифично связывать аналиты и являются альтернативой моноклональным антителам. Несмотря на то, что на практике для иммобилизации узнающих элементов активно используется метод физической сорбции, он обладает рядом недостатков, таких как: случайная ориентация на поверхности и большой процент неспецифической сорбции. В нашей работе мы рассмотрели подходы химической иммобилизации аптамера с помощью карбодиимидной сшивки через белковый комплекс «биотин-стрептавидин», а также через непосредственную пришивку аптамера через концевую аминокислотную группу. Было показано, что процент неспецифической сорбции аптамера после проведения иммобилизации на мембрану значительно ниже в случае использования комбинации «биотин-стрептавидин». Еще одной существенной проблемой диагностических тест-полосок является низкая чувствительность и невозможность количественного определения аналита. Поэтому мы предложили заменить классическую колориметрическую детекцию на ГКР-спектроскопическую (спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния), которая успешно применяется в биосенсорах, обеспечивая особо высокую чувствительность определения. Для этого вместо классических окрашенных наночастиц золота были использованы двуслойные наночастицы $\text{SiO}_2@\text{Au}$ с инкапсулированной внутри резонансной краской $\text{ar}893$ с тиольной модификацией. Таким образом, была предложена классическая сэндвич-система хроматографической аптамерной тест-полоски для определения вируса гриппа А, где регистрация уникального ГКР-спектра красителя $\text{ar}893$ опытной зоны позволяла количественно определять аналит. Методом Штобера с помощью АРТЕС были синтезированы двуслойные наночастицы $\text{SiO}_2@\text{Au}$ с аминомодификацией внешней оболочки для последующей химической иммобилизации аптамера. Причем, пришивка аптамера на силикатные нанотаги также осуществлялась направленно карбодиимидным методом. Полученные конъюгаты обладали высокой стабильностью, интенсивным ГКР-сигналом инкапсулированной метки и продемонстрировали способность связывать вирус гриппа А.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-65-00015).

Самоорганизация массива наночастиц Ag и Au на инертной поверхности в процессе PVD и отжига

Д.Г. Громов,^{1*} Р.Л. Волков,¹ С.В. Дубков,¹ Т.С. Гришин,² Д.В. Новиков,¹ Н.И. Боргардт¹

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1*

²*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, 115487 Москва, Россия*

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

Для практического применения крайне важно обладать пониманием процессов формирования и эволюции массивов металлических наночастиц. Это позволяет точно управлять их параметрами, получая желаемые свойства для конкретных задач. В этой работе был проведён анализ закономерностей трансформации геометрии массивов серебряных и золотых наночастиц при конденсации на твердотельной подложке и оказании на них энергетического воздействия (отжига) в вакууме. Произведена классификация кристаллических решеток наночастиц в массиве в зависимости от их размера. Установлено, что наночастицы Ag до 3 нм в диаметре имеют практически идеальную ГЦК-структуру, тогда как наночастицы большего диаметра демонстрируют преимущественно икосаэдрические или декаэдрические грани. Определено, что даже при слабом энергетическом воздействии имеет место эволюция массива наночастиц, что обусловлено одновременно идущими процессами миграции отдельных атомов по поверхности, коалесценции наночастиц и испарения. Показано, что эволюция массивов наночастиц Ag и Au при энергетическом воздействии идёт под действием разных механизмов.

Детальный анализ массивов с помощью ПЭМ позволил классифицировать наночастицы серебра и золота по типам: малые монокристаллические наночастицы, монокристаллические двойниковые, икосаэдрические, декаэдрические и поликристаллические наночастицы. Установлено, что наибольшая доля в массиве принадлежит мелким монокристаллическим наночастицам. Монокристаллический тип преобладал для частиц размером 1–3 нм, декаэдрический для частиц размером 3–4 нм и икосаэдрический для частиц размером 4–5 нм. Для размеров частиц более 6 нм преобладающим становился тип поликристаллический.

Исследование поведения массивов наночастиц в ПЭМ в реальном времени позволило определить различные механизмы коалесценции для серебра и золота. В случае Ag укрупнение наночастиц происходит через газовую фазу по механизму Ostwald ripening. При сближении частицы Ag замирают на некотором расстоянии, после чего замечен процесс массопереноса атомов от более мелкой к более крупной частице. При этом процессе так же было замечено уменьшение обеих наночастиц, что говорит о протекании одновременно двух процессов: испарения и коалесценции. В случае Au было выявлено, что объединение наночастиц зависит от их взаимной кристаллической ориентации. Если плоскости кристаллической решетки частиц расположены в продолжение друг друга или повернуты под углом, между ними постепенно формируется атомный «мостик», после образования которого частицы резко объединяются. В случаях, когда плоскости кристаллической решетки наночастиц расположены параллельно, в некоторый момент при некотором сближении (порядка 0,7 нм) происходит объединение «скачком» без возникновения между частицами мостика.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2023-2025 гг. соглашение FSMR-2023-0003.

Применение водорастворимых тетразолов для определения антибиотикорезистентности

В.А. Мушенков,^{1*} В.И. Кукушкин,² Е.Г. Завьялова¹

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

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

Антибиотикорезистентность – одна из наиболее важных проблем современной медицины. Устойчивые инфекции являются причиной, прямой или косвенной, более 4 млн смертей ежегодно, а по различным прогнозам смертность достигнет 10 млн человек к 2025 году. Для резистентных инфекций частота нерезультативности лечения может достигать 50%, однако это не всегда связано с высокой устойчивостью патогена: так, часто применяются эмпирические схемы лечения, не основанные на данных об устойчивости патогенов. Одна из причин этого – длительность (несколько суток) анализа резистентности. Разработка быстрых и универсальных методов анализа антибиотикорезистентности является важной задачей. Ранее нами был разработан метод определения антибиотикорезистентности, использующий МТТ – тест для оценки метаболической активности бактерий и влияния антибиотика на неё [1]. МТТ – тест основан на ферментативной реакции восстановления тетразолиевых красителей (чаще всего МТТ) до соответствующих формазанов. Под действием антибиотика метаболическая активность бактерий снижается, что отражается на количестве выработанного клетками формазана. Для специфичного определения формазана в бактериях нами был применён метод спектроскопии комбинационного рассеяния, позволяющий определить формазан без влияния других компонентов среды на точность анализа. Разработанный метод позволяет в течение 1-2 часов получить результаты об устойчивости исследуемого штамма. Кроме МТТ, в бактериальных исследованиях также часто используются и другие тетразолиевые соли, такие как ХТТ и WST-8. В отличие от МТТ, данные тетразолы и их формазаны хорошо растворимы в воде, но они не могут проходить внутрь клеток и нуждаются в дополнительном переносчике электронов для восстановления. Однако, несмотря на более сложный механизм восстановления, ряд работ показывает большую чувствительность и воспроизводимость результатов тестов, основанных на ХТТ или WST-8. В данной работе мы оптимизировали методику для использования водорастворимых тетразолов для определения антибиотикорезистентности. Мы сравнили спектры формазанов ХТТ и WST-8 и отобрали последний как наиболее подходящий для спектроскопии КР. Чувствительность определения формазана WST-8 как в чистом растворе, так и в клеточной суспензии оказалась выше, чем у формазана МТТ, с примерно в 10 раз более низким пределом обнаружения, а получаемые значения минимальных ингибирующих концентраций имели меньшее отклонение от референсных значений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-65-00015.

Литература

[1] Mushenkov V., Zhigalova K., Denisov P., Gordeev A., Lukyanov D., Kukushkin V., Priputnevich T., Zavyalova E. Rapid Raman spectroscopy-based test for antimicrobial resistance. Open Biol. (2025).

Анализ поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния света в плазме крови пациентов со злокачественными и доброкачественными новообразованиями эндометрия в сравнении с контрольной группой

Д.Н. Артемьев,¹ Л.А. Братченко,¹ А.А. Карманова,¹ В.И. Кукушкин,² В.М. Зуев³

¹Самарский университет, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д.34

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

³Сеченовский университет, 119048, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2

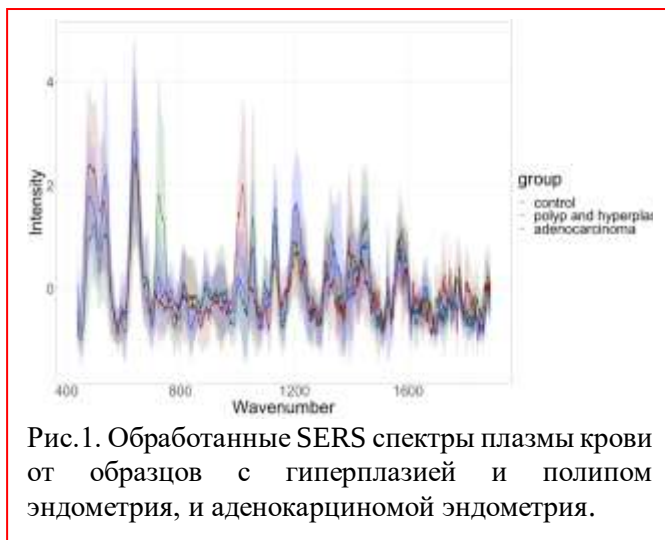


Рис.1. Обработанные SERS спектры плазмы крови от образцов с гиперплазией и полипом эндометрия, и аденокарциномой эндометрия.

Цель исследования. Повышение эффективности ранней диагностики рака эндометрия у женщин и усовершенствование дифференциальной диагностики доброкачественных заболеваний и рака эндометрия с помощью анализа поверхностно-усиленного рамановского рассеяния плазмы крови. Материалы и методы. Проведено исследование плазмы крови пациенток в возрасте от 22 до 79 лет. В исследование вошли 95 женщин. Все пациентки были разделены на 3 группы: 1-я группа – 29 женщин с аденокарциномой эндометрия, 2-я – 31 пациентка с

полипом эндометрия, 3-я – 10 женщин с гиперплазией эндометрия. Группа сравнения: 25 здоровых женщин. Исследование плазмы крови проводилось с помощью спектроскопии поверхностно-усиленного рамановского рассеяния (SERS – surface-enhanced Raman spectroscopy). Оценка спектральных значений исследуемого SERS-субстрата с высушенными образцами проводили на экспериментальном стенде, состоящем из спектрометрической системы RL785 (ООО «ФОТОН-БИО», Россия) на основе ПЗС-детектора и источника лазерного излучения с длиной волны 785 нм и микроскопа ADF U300 (ADF, Китай). С целью реализации эффекта поверхностного усиления рамановского сигнала от плазмы крови мы применили серебряный субстрат на основе высушенного коллоида серебра.

В проведенном исследовании была произведена оценка и определены спектральные особенности и специфические признаки, характерные для аденокарциномы, полипов и гиперплазии эндометрия. Выявлены спектральные и количественные отличия для каждой патологии, необходимые для дифференцированной диагностики патологических тканей. Точность оптической диагностики при разделении классов аденокарциномы эндометрия относительно контрольной группы и гиперплазии эндометрия для калибровочного и проверочного набора спектров составила 87 и 85 %, соответственно. Точность разделения классов контрольной группы относительно гиперплазии и аденокарциномы эндометрия составили 86 и 85 %, а гиперплазии эндометрия относительно контрольной группы и аденокарциномы эндометрия 81 % для калибровочного и проверочного наборов спектров.

Проведенное исследование показало возможность использования поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии для дифференциальной экспресс-диагностики рака эндометрия и его доброкачественных патологических состояний.

Разработка ГИС датчика мощности

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

Развитие СВЧ-измерительного оборудования и уход с рынка ведущих иностранных производителей обусловили необходимость создания отечественных датчиков мощности, способных конкурировать с зарубежными аналогами и обеспечить независимость промышленности. Современные ваттметры часто изготавливают в виде гибридных или монолитных интегральных схем на основе диодных детекторов [1–2], что обосновано их быстрым реагированием, высокой точностью измерения и широким динамическим диапазоном [3].

Наша команда разработала и промоделировала в ANSYS HFSS датчик мощности на основе низкочастотных диодов, оптимизируя его конструкцию для работы до 40 ГГц.

Структура ГИС включает RF-вход с разделительным конденсатором, переход с копланарной на микрополосковую линию и два детектирующих плеча, разделённых 6 дБ делителем. Во втором плече установлен 30 дБ аттенюатор для измерения высокой мощности без перегрузки, что расширяет динамический диапазон. Оба плеча содержат МИС-детекторы MD903, подключённые к шлейфу считывания сигнала.

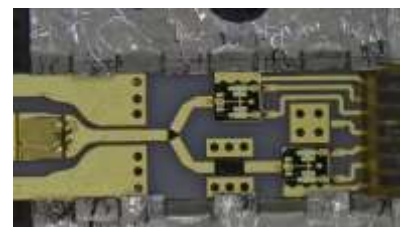
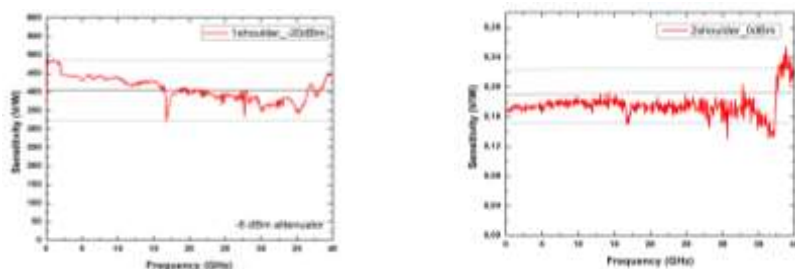


Рис.1. Общий вид сборки ГИС датчика мощности

По результатам моделирования собран макет (Рис. 1) на поликоре толщиной 254 мкм с топологической точностью 10%. Сквозные отверстия — 0.2 мм. Двусторонняя металлизация Ti/Pt/Au — не менее 3 мкм. Резистивный слой — TaN 50 Ом/кв $\pm 10\%$. МИС смонтированы микроманипулятором, соединения выполнены микросваркой золотой лентой.

Также проведены испытания макета, подтвердившие его работоспособность и соответствие расчётным характеристикам (Рис. 2).



а б
Рис.2 Результаты измерений: а) низкомощный канал, б) высокомощный канал с аттенюатором.

Литература

- [1] Старцев, А. В. Современные измерители мощности СВЧ / А. В. Старцев // Вестник метролога. – 2011. – С. 24-25
- [2] Agilent Power Meters and Power Sensors. High performance solutions for peak and average power measurements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.home.agilent.com>
- [3] Agilent Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements. Application Note 1449-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.home.agilent.com>

Межслоевой экситон в структурах на основе монослоёв MoSe_2 и WSe_2 под действием электрического поля

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

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

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

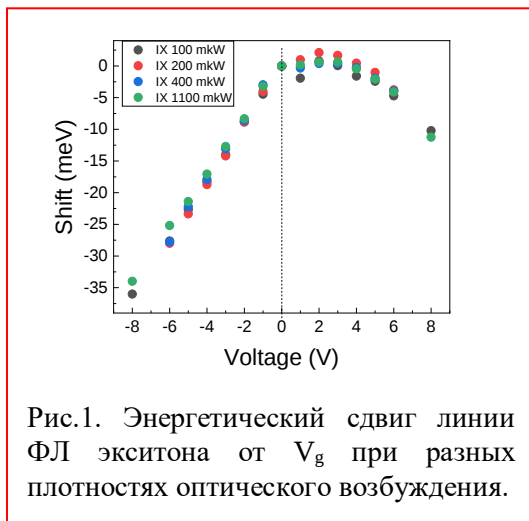


Рис.1. Энергетический сдвиг линии ФЛ экситона от V_g при разных плотностях оптического возбуждения.

Межслоевые экситоны в Ван-дер-Ваальсовых гетероструктурах с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) привлекают интерес из-за большой энергии связи (~ 100 мэВ) и большого времени жизни (до 100 нс). Электрическое поле является эффективным инструментом управления плотностью носителей заряда в монослоях, дипольными моментами экситонов и их энергией связи. Для того, чтобы исследовать влияние электрического поля на межслоевые экситоны в монослоях ДПМ, методом механической эксфолиации и последовательной сборки структуры на подложке Si/SiO₂ были изготовлены образцы типа: Graphene-hBN-WSe₂-MoSe₂-hBN-Graphite, для

приложения электрического поля термическим напылением были изготовлены контакты Gr(50 нм)/Au(250 нм). Измерения спектров фотolumинесценции (ФЛ) проводились в оптическом гелиевом криостате при температуре ≈ 10 K.

На Рис.1 приведена зависимость энергетического сдвига линии ФЛ межслоевого экситона от приложенного напряжения V_g . Видно, что в одном направлении электрического поля линия ФЛ демонстрирует большой линейный сдвиг (до 35 мэВ в поле 8 В), что хорошо согласуется с наличием у межслоевых экситонов ненулевого дипольного момента [1]. При противоположном направлении приложенного электрического поля поведение сдвига линии ФЛ экситона более сложное, при этом качественно поведение энергетического сдвига мало зависит от плотности оптического возбуждения в широком диапазоне накачек (рис.1). Кроме линии межслоевого экситона IX, в спектре ФЛ наблюдается также линия межслоевого триона IT [1], которая доминирует при низких плотностях оптического возбуждения и демонстрирует аналогичный линии IX сдвиг от напряжения V_g .

Вычислена энергия связи межслоевого экситона для двуслойной структуры WSe₂-MoSe₂, инкапсулированной hBN методом решения уравнения Шредингера с модифицированным потенциалом Рытовой-Келдыша [2-3]. Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволяет определить величину электрического поля и эффективное расстояние между слоями в зависимости от приложенного напряжения.

Литература

- [1] E. V. Calman, L. H. Fowler-Gerace, D. J. Choksy et.al. Nano Lett. 20, 3 (2020).
- [2] N.A. Asriyan, I.L. Kurbakov, A.K. Fedorov, et al. Phys.Rev. B99, 085108 (2019).
- [3] М.А. Семина. Физика твёрдого тела, том 61, вып. 11, 2234. (2019).

Измерение плотности состояний магнитоплазмонов в двумерной электронной системе на факторе заполнения $\nu = 1$

Е.М. Буданов,^{1*} А.В. Ларионов,² Л.В. Кулик²

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 109028, Москва, Покровский бульвар, д.11

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

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

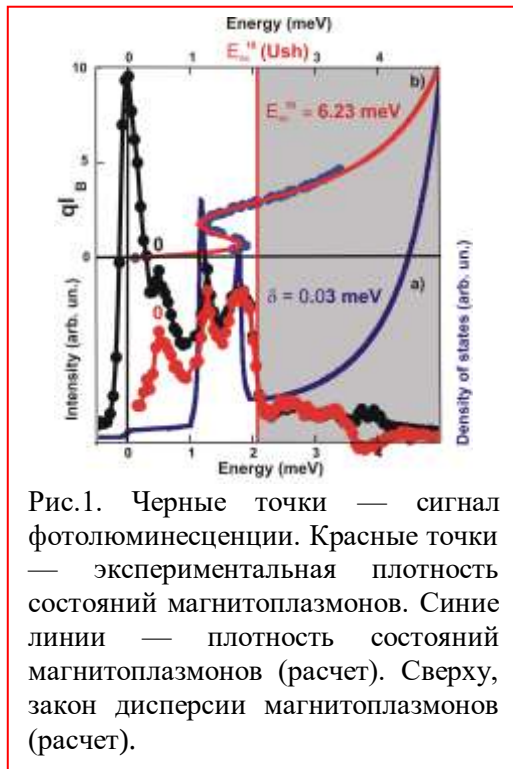


Рис.1. Черные точки — сигнал фотолуминесценции. Красные точки — экспериментальная плотность состояний магнитоплазмонов. Синие линии — плотность состояний магнитоплазмонов (расчет). Сверху, закон дисперсии магнитоплазмонов (расчет).

Исследовались спектры резонансной и нерезонансной фотолуминесценции двумерной электронной системы на факторе заполнения электронов $\nu = 1$. В качестве исследуемого образца использовалась высокоподвижная гетероструктура GaAs/AlGaAs с симметрично легированной квантовой ямой. Образец помещался во вставку с откачиваемыми парами ^3He ($T \approx 0,6$ К), расположенную внутри ^4He криостата со сверхпроводящим соленоидом. С помощью системы линз лазерное излучение фокусировалось на образце, и сигнал фотолуминесценции регистрировался ПЗС камерой, сопряженной со спектрометром. Использовались два лазерных источника: узкополосный лазер, перестраиваемый по длине волны в диапазоне 750–850 нм, и одномодовый лазерной диод с центральной длиной волны 785 нм.

Симметричное легирование квантовой ямы и высокая темновая подвижность электронов ($\mu_e \approx 5 \cdot 10^6$ см²/(В·с)) позволяют исследовать магнитовозбуждения в конечном состоянии [1]. При

лазерном возбуждении с энергиями фотонов, превышающими циклотронную энергию на несколько энергий оптического фона, релаксация электронов приводит к формированию магнитоплазмонов в широком диапазоне импульсов. При этом интенсивность сигнала фотолуминесценции отражает плотность состояний магнитоплазмонов [2].

Был вычислен закон дисперсии магнитоплазмонов с использованием геометрического форм-фактора [3]. Оказалось, что экспериментально определенные энергетические положения особенностей Ван Хофа в плотности состояний магнитоплазмонов совпадают с расчетными значениями (Рис.1). Удивительным является отсутствие магнитоплазмонов с высокими энергиями, что не может быть объяснено изменением потенциала межэлектронного взаимодействия [2].

[1] L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. B. Timofeev, S. Dickmann, and I. V. Kukushkin, Sci Rep. 5, 10354 (2015).

[2] Е. М. Буданов, Д. А. Щигарев, Л. В. Кулик, А. Б. Ваньков, А. В. Ларионов, А. В. Горбунов, В. Уманский, Письма в ЖЭТФ 121, 681 (2025).

[3] A. Pinczuk, B. S. Dennis, D. Heiman, C. Kallin, L. Brey, C. Tejedor, S. Schmitt-Rink, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. 68, 3623 (1992).

Формирование управляемых недеградирующих ГКР-активных структур на основе тонкой пленки Ag-Nb для фотонной сенсорики

**Ю.В. Чумаченко,^{1*} Д.В. Новиков,¹ С.А. Кондратьева,¹ С.В. Дубков,¹
Д.Г. Громов,¹ Л.С. Волкова,^{1,2} С.А. Гаврилов¹**

¹*Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», 124498 Москва, Зеленоград, Россия*

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

*e-mail: julia.chumachenko@mail.ru

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) представляет собой высокочувствительный неинвазивный метод, позволяющий получать данные о химическом составе веществ и идентифицировать молекулярные «отпечатки пальцев». Благодаря этим возможностям, метод находит применение в различных областях, включая медицинскую диагностику, криминалистические исследования, контроль производственных процессов и обеспечение безопасности пищевой продукции. Подложки, основанные на эффекте ГКР, представляют собой многообещающий инструмент для высокочувствительного и быстрого анализа как в лабораторных условиях, так и за их пределами. Ключевым эффектом ГКР-подложек является массив наночастиц на поверхности, который в большинстве случаев формируется литографическими, химическими и физическими методами. В связи с этим возникает проблема эксплуатации, связанная с окислением плазмонного материала и адсорбцией веществ поверхностью ГКР-подложки.

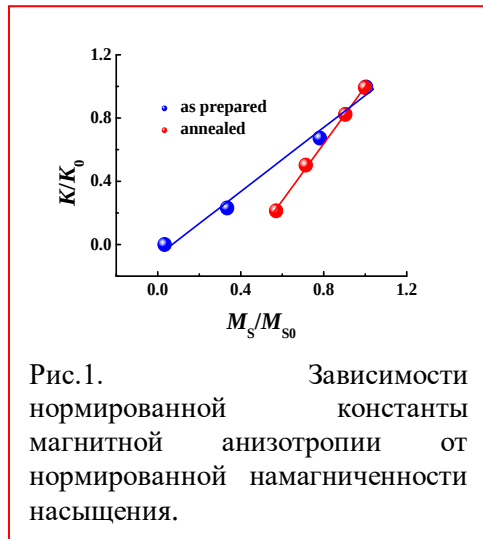
Перспективным подходом к решению данной проблемы может служить применение тонких многокомпонентных плёнок, которые при энергетическом воздействии формируют на поверхности наночастицы, усиливающие сигнал комбинационного рассеяния (КР) света. Такие подложки сохраняют стабильность характеристик в течение длительного времени, поскольку плазмонный материал остается защищённым внутри плёнки до момента проведения непосредственных измерений.

В данной работе было исследовано влияние различных режимов активации на ГКР-сенсоры на основе тонкой многокомпонентной плёнки Ag-Nb-N-O. Энергетическое воздействие осуществлялось тремя вариантами: СВЧ-излучением при постоянной мощности в течение разного промежутка времени; пропусканием электричества в гальваностатическом и потенциостатическом режиме при разных заданных значениях тока и напряжения в течение фиксированного времени; посредством вакуум-термического отжига при различных температурах. Изменения морфологии поверхности тонкой плёнки и формирующегося массива производилось методом растровой электронной микроскопии. Спектроскопические исследования проводились с помощью Рамановского микроскопа Confotec MR200. Анализируемыми веществами выступали растворы малахитового зелёного оксалата и родамина 6G различных концентраций. Был установлен предел детектирования и коэффициент усиления структур.

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

Магнитная анизотропия в $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ А.И. Дмитриев,* М.С. ДмитриеваФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Московская обл., Черноголовка,
пр. Академика Семенова, д.1

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



С помощью вибрационного магнитометра измерены зависимости магнитного момента от напряженности магнитного поля $M(H)$ в широком диапазоне температур поликристаллических образцов замещенного феррита лантана-стронция $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ [1] до и после вакуумной термообработки. Аппроксимация зависимостей $M(H)$ образцов до и после вакуумной термообработки известным законом приближения к насыщению позволила установить значения поля магнитной анизотропии H_A и намагниченности насыщения M_S для каждой температуры, которые в свою очередь были пересчитаны в значения констант магнитной анизотропии K . Температурная зависимость констант магнитной анизотропии K в обоих случаях с высокой точностью описывается эмпирическим выражением Брюхатова-Киренского. Вакуумный отжиг с одной стороны вызывает ослабление магнитной анизотропии (в исходных образцах $K_0 = 7 \cdot 10^4 \text{ erg/cm}^3$, в отожженных образцах $K_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ erg/cm}^3$), с другой – ослабляет ее зависимость от температуры. Ослабление магнитной анизотропии в результате вакуумной термообработки обусловлено синергетическим эффектом уменьшения искажения кристаллической решетки, усиления антиферромагнитного обмена и ослабления спин-орбитального взаимодействия. Ослабление зависимости $K(T)$ в результате вакуумной термообработки находит свое объяснение в рамках общего закона температурной зависимости констант магнитной анизотропии (закона степени $l(l+1)/2$).

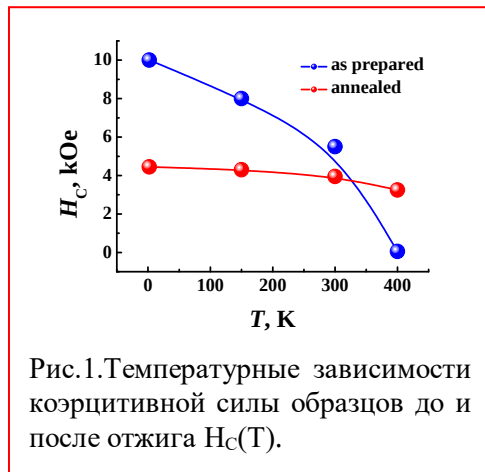
Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания 124013100858-3.

Литература

[1] В.Д. Седых, В.С. Русаков, Т.В. Губайдулина, ФТТ 65, 629 (2023).

Магнитный гистерезис в $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ А.И. Дмитриев,* М.С. ДмитриеваФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Московская обл., Черноголовка,
пр. Академика Семенова, д.1

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



С помощью вибрационного магнитометра измерены петли магнитного гистерезиса в широком диапазоне температур поликристаллических образцов замещенного феррита лантана-стронция $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{FeO}_{3-\delta}$ [1] до и после вакуумной термообработки. Форма петель магнитного гистерезиса в обоих случаях типична для слабых ферромагнетиков и наследует форму кривых $M(H)$ антиферромагнетиков, и ферромагнетиков. Антиферромагнитная составляющая проявляется в сравнительно сильных магнитных полях, где зависимость $M(H)$ линейна. Ферромагнитная составляющая, проявляется в сравнительно слабых магнитных полях и демонстрирует довольно значительный гистерезис и тенденцию к насыщению. Определены температурные зависимости коэрцитивной силы $H_c(T)$ образцов до и после вакуумной термообработки (рис.1). В образцах обеих серий повышение температуры приводит к сужению петли магнитного гистерезиса, однако кривые $H_c(T)$ не описываются ни одним известным эмпирическим выражением. Коэрцитивная сила H_c в исходных образцах достигает 10 kOe при $T = 2$ К. Падение H_c с ростом T происходит достаточно быстро, так что при 400 К коэрцитивная сила едва превышает ноль. Вакуумная термообработка вызывает уменьшение коэрцитивной силы, так что в отожженных образцах H_c не достигает и 5 kOe при $T = 2$ К. В тоже время в отожженных образцах коэрцитивная сила с температурой почти не меняется. Анализ значений коэрцитивной силы в координатах $H_c(H_A)$ в рамках теории Кронмюллера позволил вскрыть микроскопический механизм, ответственный за формирование магнитного гистерезиса в образцах до и после вакуумной термообработки. В исходных образцах таковым является закрепление доменных стенок на малых дефектах, размеры которых меньше толщины доменной стенки. В отожженных образцах – закрепление доменных стенок на крупных дефектах, размеры которых больше толщины доменной стенки. Вариации зависимости $H_c(H_A)$, вызванные вакуумной термообработкой, находят свое объяснение в рамках изменения дефектной структуры и состояния межзеренных границ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания 124013100858-3.

Литература

[1] В.Д. Седых, В.С. Русаков, Т.В. Губайдулина, ФТТ 65, 629 (2023).

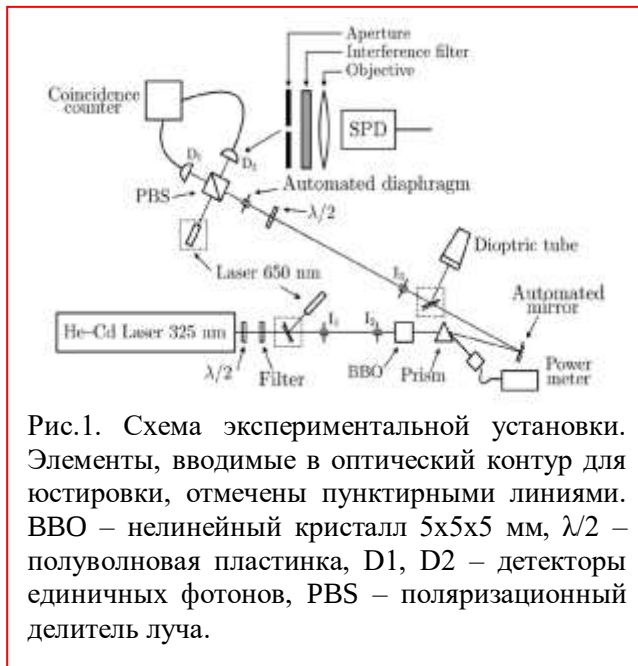
Схема коллинеарного вырожденного спонтанного параметрического рассеяния II типа для измерения квантовых эффективностей

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

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

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

*e-mail: gavrilov.arsenii@phystech.edu



Метод безэтальной квантовой фотометрии, впервые предложенный Клышко и Зельдовичем в 1969 году [1], получил широкое применение в метрологических приложениях. Этот метод основан на свойствах сильно коррелированных двухфотонных состояний, или биофотонов, которые генерируются в процессе спонтанного параметрического рассеяния (СПР). Рассмотрим пару детекторов D_1 и D_2 , которые регистрируют сигнальный и холостой фотоны из рожденной в результате СПР пары. Количество отсчетов N_1 и N_2 на каждом детекторе, а также количество совпадений N_c , определяется по следующим формулам:

$$N_1 = \eta_1 N, N_2 = \eta_2 N, N_c = \eta_1 \eta_2 N.$$

Здесь η_1 и η_2 – квантовые эффективности детекторов D_1 и D_2 , N – общее количество пар фотонов. Несмотря на кажущуюся простоту формул, на данный момент квантовая фотометрия не стала новым метрологическим стандартом. Причиной этого, на наш взгляд, является рассмотрение фотона как классической частицы, без учёта квантовой природы. В нашей работе мы предлагаем простую схему безэтальной квантовой фотометрии и приводим квантовый учёт коррелированного прохождения бифотона через диафрагму, основанный на работе [2]. Использование СПР II типа позволяет упростить расчётные формулы, используемые для I типа [3].

Литература

- [1] Клышко Д.Н., Пенин А.Н., УФН, том 152, с. 653 (1987).
- [2] C. Monken, P. Souto Ribeiro, & S. Padua. Optimizing the photon pair collection efficiency: A step forward to a loophole-free Bell's inequalities experiment. Phys. Rev. A (1998).
- [3] С.Ю.Цовьянов, В.В.Землянов, М.В.Лебедев, О.В.Мисочко, А.В.Соловьёв и Г.Б.Лесовик «Новая схема безэтальной квантовой фотометрии». Тезисы докладов Четвёртой школы молодых ученых «Новые материалы и технологии для систем безопасности», 1-2 июня 2022, г. Черноголовка., С. 28. (год публикации - 2022).

Влияние погрешностей приготовления и считывания квантовых состояний на безопасность квантового распределения ключей

А.С. Калашникова,^{1*} Д.В. Сыч²

¹НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

²ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

*e-mail: batmankuro99@gmail.com

Квантовое распределение ключей (КРК) обеспечивает информационно-безопасную коммуникацию между пользователями по открытому каналу связи. Модельное описание атак на КРК предполагает произвольные действия подслушивателя (Евы). В данной работе мы рассматриваем два типа атак: перехват-перепосыл (п-п) и оптимальное клонирование, и анализируем их эффективность с учётом погрешностей приготовления и считывания квантовых состояний, и погрешностей действий Евы.

При атаке п-п Ева перехватывает фотон, измеряя его в произвольном базисе, и отправляет результат своего измерения Бобу. Мы исследуем влияние погрешностей Алисы, Боба и Евы в процессе подготовки и детектирования состояний на уровень ошибок (QBER). Также рассмотрен случай неравновероятного выбора базиса Алисой (параметр a) и выбор базиса Евой для считывания и приготовления (параметр x). При атаке оптимальным клонированием Ева применяет унитарное преобразование к своему вспомогательному состоянию и состоянию в канале, создавая запутанность с Бобом, описываемую двумя параметрами (θ , ϕ) [1]. Критерием безопасного распределения секретного ключа выступает выполнение условия $I_{AB} > I_{AE}$. В данной модели учитывается влияние погрешностей на стороне Алисы и Боба, а также погрешности Евы, которые заключаются в неточном приготовлении затравочного состояния для применения унитарного преобразования, и неточном задании параметров θ и ϕ .

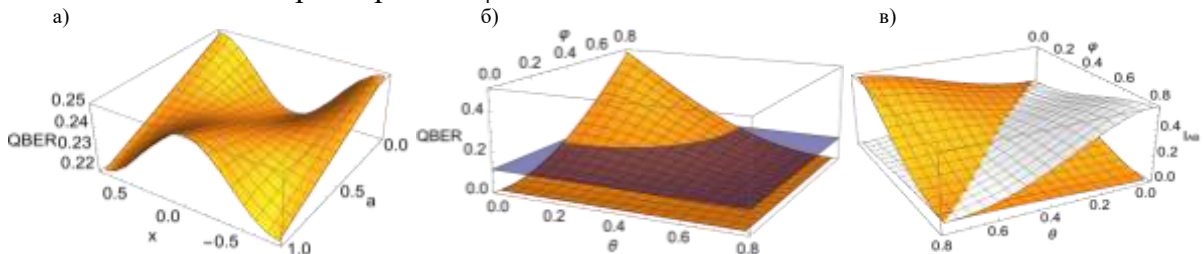


Рис.1. а) Зависимость QBER от вероятности выбора диагонального базиса и угла базиса Евы для атаки п-п. Видно, что оптимальная стратегия атаки достигается, когда выбор базиса Евы совпадает с выбором базиса Алисой ($a=1, x=\pi/4$ и $a=0, x=0$); б) Зависимость QBER от параметров клонирования θ и ϕ для атаки с оптимальным клонированием; в) Взаимная информация между Алисой и Бобом (I_{AB}) и Алисой и Евой (I_{AE}) в зависимости от параметров клонирования θ и ϕ .

Результат анализа атаки п-п показан на Рис. 1а. Минимальный QBER (22%) достигается при совпадении базисов считывания и приготовления Евы. Результат анализа атаки оптимальным клонированием представлен на Рис.1б) и 1в). Учет погрешностей приготовления и считывания показывает увеличение симметричности I_{AB} и I_{AE} , и при 50% погрешности график становится полностью симметричным. При этом погрешность Евы в 50% снижает I_{AB} , но не влияет на вид графиков I_{AB} и I_{AE} и их пересечение (условие генерации секретного ключа).

Литература

[1] Sych, D. V., Grishanin, B. A., & Zadkov, V. N. (2004). Critical error rate of quantum-key-distribution protocols versus the size and dimensionality of the quantum alphabet. *Physical Review A*, 70(5), 052331.

Перестраиваемый метаматериал на основе двумерной электронной системы в геометрии разрезного кольцевого резонатора

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

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

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9*

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

Интенсивное развитие науки о метаматериалах в настоящее время существенным образом стимулирует интерес к плазменным возбуждениям в двумерных электронных системах (ДЭС). Спектр применений и эффективность метаматериалов, основное преимущество которых проистекает из произвольности выбора конфигурации структуры, могут быть существенно расширены за счет перестроения электромагнитных свойств таких структур в процессе работы, что естественным образом достигается путем использования ДЭС в основе метаматериала. В текущей работе исследованы двумерные плазменные возбуждения в мезаструктурах, имеющих геометрию разрезного кольцевого резонатора с различными геометрическими параметрами. Особый акцент сделан на исследовании возможности перестроения электромагнитного отклика в таких метаматериалах.

В основу модели положена полупроводниковая гетероструктура GaAs/AlGaAs с характерными значениями концентрации высокоподвижных ($\mu = 4 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$) электронов в квантовой яме $n_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ при температуре $T = 4.2 \text{ К}$. Численный анализ состоял в решении уравнений Максвелла методом конечных элементов в специализированной программной среде. Для экспериментального подтверждения результатов численного анализа были изготовлены мезаструктуры в форме разрезного кольцевого резонатора с различной геометрией разреза, а также с несколькими затворами посредством оптической фотолитографии. Регистрация плазменных возбуждений производилась посредством оптической методики, основанной на высокой чувствительности спектра рекомбинантной фотолюминесценции ДЭС к микроволновому разогреву [1].

Спектр микроволнового поглощения разрезного кольцевого резонатора помимо фундаментального дипольного плазменного резонанса, определяемого половиной длины кольца, содержит также дополнительную низкочастотную плазменную моду, определяемую длиной кольца. Показано, что за счет варьирования геометрических параметров разреза, а также за счет приложения обедняющего потенциала на затворы вблизи двумерной системы, как низкочастотный, так и фундаментальный плазменный резонансы могут быть перестроены, что открывает перспективы использования такого метаматериала в качестве фазового элемента. В этой связи существенным представляется еще один результат численного моделирования, согласно которому низкочастотный плазменный резонанс в разрезном кольцевом резонаторе на основе ДЭС может быть возбужден не только переменным электрическим, но и переменным магнитным полем, при чем частоты таких электрического и магнитного резонансов совпадают.

Литература

[1] Muravev V. M. *et al.* Physical Review B, 93 (4), 041110 (2016).

Модифицированная фемтосекундным лазерным импульсом планарная кремниевая подложка с наночастицами серебра для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света

М.Д. Крузалина,^{1*} Д.В. Новиков,¹ А.О. Козлов,² Л.С. Волкова,^{1,3} П.А. Данилов,⁴ И.Н. Сараева,⁴ С.В. Дубков,¹ С.И. Кудряшов⁴

¹*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1*

²*НПК «Технологический центр», 124498 Москва, Зеленоград, Россия*

³*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, 115487 Москва, Россия*

⁴*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Россия*

**e-mail: kruzalina43@gmail.com*

Благодаря способности обнаруживать чрезвычайно низкие концентрации веществ, вплоть до детектирования одной молекулы, спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) имеет перспективы применения в областях, требующих высокой чувствительности, таких как биологический и химический анализ, медицина, экология и сельскохозяйственная промышленность. Еще одним высокочувствительным методом для детектирования веществ сверхмалых концентраций является гигантское инфракрасное поглощение света (ГИПС) или инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье. По своей природе эти два метода считаются комплементарными, однако ключевыми элементами ГКР-сенсоров являются наночастицы благородных металлов, а ГИПС преимущественно работает на более крупных структурах, например, на упорядоченных микро решетках. Интересной является возможность объединения этих двух методов с помощью создания гибридной ГКР/ГИПС-подложки, использование которой могло бы расширить спектр применения высокочувствительного анализа. Однако совместить наночастицы и микро структуры на одной подложке, одинаково хорошо работающие и для ГКР, и для ГИПС является непростой задачей, так как любая неравномерность поверхности, на которой осаждены наночастицы, может приводить к плохо воспроизводимым результатам измерений ввиду того, что эффект ГКР особенно чувствителен к форме, размеру и плотности наноструктур. Поэтому такой метод, как фемтосекундная лазерная абляция твердых материалов, является многообещающим методом для создания модифицированных микро- и наноструктур благодаря своей простоте, дешевизне и повторяемости.

Исследована планарная Si/Cr/Ag/SiO₂/Ag(HЧ) ГКР-подложка, модифицированная фемтосекундной лазерной абляцией в одноимпульсном режиме с различной энергией импульсов в диапазоне от 1,4 до 9,8 нДж. Длина волны лазера составляла 515 нм, длительность импульсов – 300 фс. Фокусировка осуществлялась микрообъективом с числовой апертурой NA=0,25. Область сканирования составляла 500×500 мкм для массивов с периодом 6 и 8 мкм для скоростей сканирования 60 и 80 мкм/с соответственно. С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) получены изображения записанных массивов, демонстрирующие различное поведение наночастиц в зависимости от энергий импульса. Проведен статистический анализ данных интенсивности ГКР-спектров малахитового зеленого MG с концентрацией 10 мкМ в зависимости от энергий импульса лазера. Проведены измерения ИК-отражения модифицированных и немодифицированных участков подложки с нанесением на них бактерий *Pseudomonas aeruginosa* (синегнойная палочка).

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

Применение когерентных антенных решеток для гигантского усиления рамановского рассеяния света в цельнометаллических SERS-подложках

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

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

Одна из важнейших задач бионанотехнологии заключается в разработке дешевых SERS-структур, работающих с максимальным усилением как в видимом диапазоне длин волн, так и в ближней ИК-области. В настоящей работе мы разработали дешевую цельнометаллическую SERS-структуру с когерентными антенными решетками, которые обеспечивали рекордные коэффициенты SERS-усиления для всех длин волн лазера: 532 нм, 638 нм, 785 нм и 1064 нм. Этот факт делает такие структуры весьма привлекательными для практического использования. Для создания синфазной антенной решетки использовались образцы кремния с металлической маской, представляющей собой сплошную металлическую поверхность с вырезанными из нее квадратами, обнажающими поверхность кремния. Размер этих квадратов составляет примерно $2/3$ от периода, который составлял 2 мкм. Далее использовался процесс изотропного травления кремния в установке плазмохимического травления в смеси газов O_2 и SF_6 . При этом глубина травления в активной области составляла 1060-1080 нм. Затем металлическая маска удалялась в хромовом травителе, и в результате получались тонкие столбики диаметром примерно 400 нм и высотой около 1070 нм с периодом 2 мкм в обоих направлениях. Далее методом вакуумного термического напыления структурированная поверхность кремния покрывалась слоем серебра толщиной около 1 мкм. В результате использования описанной выше технологии удавалось получать цельнометаллические SERS-структуры, которые представляли собой суперпозицию квадратных отверстий в серебре с тонкими ребрами, на которых в вершинах квадратов присутствовали тонкие и высокие серебряные столбики (см. рис. 1). Эти столбики можно рассматривать как когерентные (синфазные) антенные решетки, которые должны значительно увеличивать коэффициент SERS-усиления. В результате проведенных исследований рамановского рассеяния света с использованием таких структур было установлено, что коэффициент SERS-усиления достигал рекордно высоких значений для всех использованных длин волн лазера (532 нм, 638 нм, 785 нм и 1064 нм) и имел значения близкие к 10^9 . Типичный спектр рамановского рассеяния представлен на рис. 2.

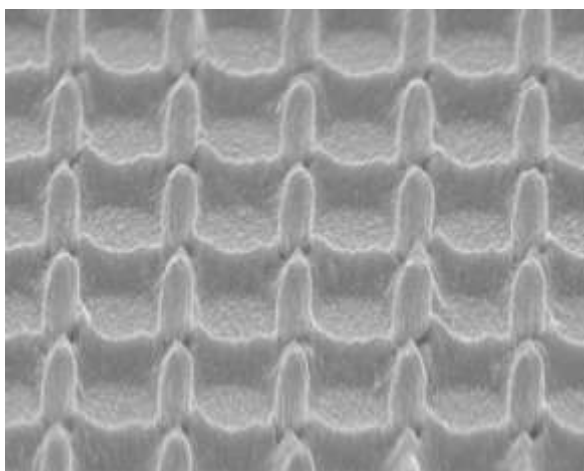


Рис. 1. Вид SERS-структуры с когерентными антенными решетками. Период 2 мкм.

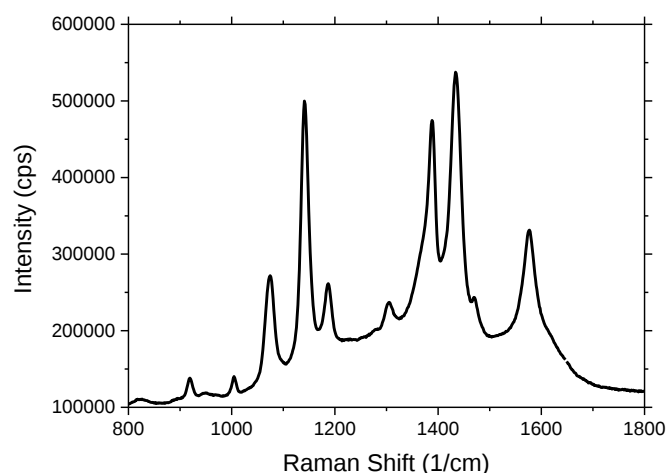


Рис. 2 Спектр рамановского рассеяния, измеренный на разработанной SERS-подложке для лазера 532 нм (10 мВт).

Фазовое расслоение под давлением в слабелегированном манганите

С.В. Зайцев, В.Д. Седых, А.В. Кузьмин, К.П. Мелетов*

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

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

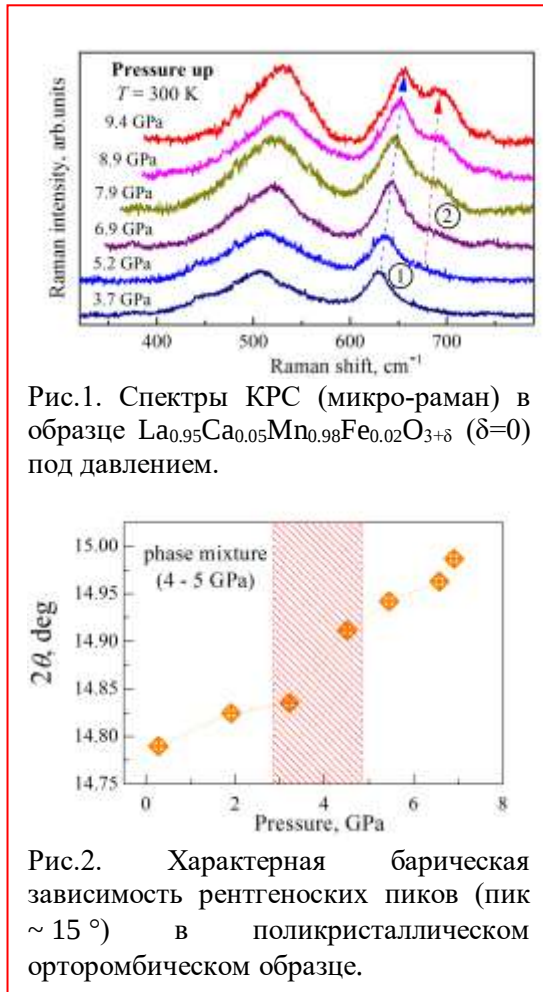


Рис.1. Спектры КРС (микро-раман) в образце $\text{La}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{3+\delta}$ ($\delta=0$) под давлением.

Рис.2. Характерная барическая зависимость рентгеновских пиков (пик $\sim 15^\circ$) в поликристаллическом орторомбическом образце.

Методами комбинационного рассеяния света (КРС) и рентгеноструктурного анализа исследованы под давлением до 20 GPa поликристаллические образцы слабелегированного кальцием манганита лантана $\text{La}_{(1-x)}\text{Ca}_x\text{Mn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{3+\delta}$ ($x = 0.05 - 0.2$) стехиометрического состава ($\delta=0$), полученные методом золь-гель [1].

Гидростатическое давление приводит к синему сдвигу и существенной перестройке рамановской моды оптического фонона $\nu_1 \sim 620 \text{ cm}^{-1}$ выше $P_0 \sim 6 \text{ GPa}$ (рис.1), отвечающего симметричным растяжениям октаэдров MnO_6 [2]. Так, с ростом $P > P_0$ выше по энергии возникает дополнительная мода $\nu_2 \sim 700 \text{ cm}^{-1}$, а её удельная интенсивность растёт с ростом давления, в то время как исходная мода ν_1 ослабляется и окончательно теряет интенсивность выше $\sim 12 \text{ GPa}$. Приложенное давление приводит также к резкому изменению барической зависимости структурных параметров при $P_0 \sim 4-5 \text{ GPa}$ (рис.2), что свидетельствует о структурной перестройке орторомбической фазы слабелегированного манганита. По аналогии с нелегированным манганитом LaMnO_3 наблюдаемое поведение интерпретируется как мезоскопическое фазовое расслоение образцов с исходным ян-

теллеровским искажением октаэдров MnO_6 и возникновение под давлением областей с неискаженными октаэдрами [2]. Ян-теллеровское искажение октаэдров заканчивается выше $\sim 12 \text{ GPa}$ с полной перестройкой рамановских фононов октаэдров ($\sim 500 \text{ cm}^{-1}$ и $\sim 620 \text{ cm}^{-1}$). Отметим, что барическое поведение индивидуально в каждом зерне порошка, что связано с неоднородностью поликристаллических образцов [1].

Литература

- [1] Д. И. Пчелина, И. Ю. Медвецкая, Н. И. Чистякова, В. С. Русаков, В. Д. Седых, Ю. А. Алехина, ПОВЕРХНОСТЬ, 6, 3 (2019).
- [2] M. Baldini, V. V. Struzhkin, A. F. Goncharov, P. Pastorino, and W. L. Mao, Phys Rev. Lett. 106, 066402 (2011).

Магнитодисперсия плазмонов в 2D системе в форме диска с боковым омическим контактом

А.В. Никонов,^{1,2*} Д.А. Родионов,¹ А.А. Заболотных¹

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7*

²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000 Москва, ул. Мясницкая, д.20*

*e-mail: avnikonov@edu.hse.ru

В работе рассмотрена двумерная (2D) электронная система в форме диска с периметрическим омическим контактом. Система помещалась в однородное диэлектрическое окружение и к ней прикладывалось перпендикулярное постоянное однородное магнитное поле.

Известно, что в 2D системе в геометрии полосы [1], частота плазменных колебаний с увеличением проводимости металлических контактов уменьшается, выходя на некоторое асимптотическое значение. Такое же поведение испытывала частота магнитоплазмонов. Однако зависимость магнитоплазменных колебаний в системе с омическим контактом при существенном влиянии эффектов электромагнитного запаздывания оставалась мало изученной, хотя, как известно, запаздывание может значительно влиять на поведение плазменных волн [2, 3].

Для нахождения магнитодисперсии — зависимости частоты плазменных колебаний от внешнего магнитного поля — решались уравнения Максвелла для электрических и магнитных полей в цилиндрических координатах. Боковой омический контакт считался идеально проводящим и бесконечным в радиальном направлении. Задача была сведена к решению интегральных уравнений, которое осуществлялось с помощью подстановки одной или ряда пробных функции. Нам были интересны лишь фундаментальные (нижайшие по частоте) плазменные моды, так как их проще всего наблюдать экспериментально.

В результате было получено, что магнитодисперсия плазмонов в изучаемой системе становится линейной и в нулевом магнитном поле частота плазмонов стремится к нулю. Причём частота колебаний лежит ниже циклотронной, и она тем ниже, чем существеннее эффекты электромагнитного запаздывания. Более того, полученные моды качественно соответствуют наблюдаемым экспериментально магнитоплазмонным резонансам. Однако ниже циклотронной частоты лежит не одна, как считалось ранее, а две магнитоплазмонные моды, соответствующие разным знакам орбитального числа.

Литература

- [1] S. A. Mikhailov and N. A. Savostianova, Influence of contacts on the microwave response of a two-dimensional electron stripe, *Physical Review B* 74, 045325 (2006).
- [2] I. V. Andreev, V. M. Muravev, N. D. Semenov, and I. V. Kukushkin, Observation of acoustic plasma waves with a velocity approaching the speed of light, *Physical Review B* 103, 115420 (2021).
- [3] A. A. Zabolotnykh and V. A. Volkov, Electrically controllable cyclotron resonance, *Physical Review B* 103, 125301 (2021).

Исследование температурной зависимости спектральных характеристик гетероструктур на основе монослоев MoSe_2

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

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

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

*e-mail: nuraev.ds@phystech.edu

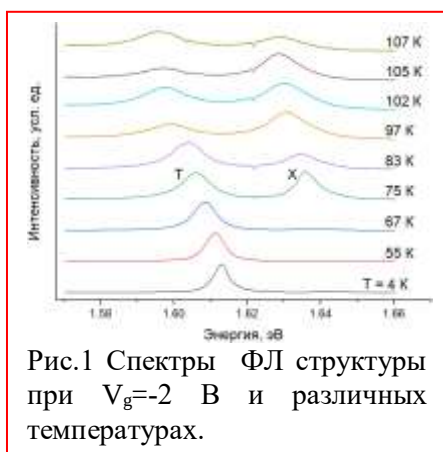


Рис.1 Спектры ФЛ структуры при $V_g = -2$ В и различных температурах.

Монослои дихалькогенидов переходных металлов являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, соответствующей оптическим переходам в видимом спектральном диапазоне.

В настоящей работе изучалась гетероструктура, состоящая из монослоя MoSe_2 , инкапсулированного гексагональным нитридом бора (hBN) и размещенного на подложке из SiO_2/Si . Структура включает два контакта: первый непосредственно контактирует с монослоем посредством графитовой обкладки для регулирования зарядовой плотности, а второй, связанный с графеновой обкладкой, изолирован от него

слоем hBN. Образец помещался в заливочный гелиевый криостат, предназначенный для оптических исследований, оснащенный системой стабилизации температуры. Экспериментальное исследование образца проводилось методом микрофотолюминесценции в диапазоне температур 4–107 К. Для возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) использовался одномодовый лазер с длиной волны 532 нм, свет которого фокусировался на поверхности структуры с помощью объектива, формируя пятно диаметром 2–3 мкм.

Были получены спектры ФЛ образца при различных температурах и напряжениях на контактах V_g . Один из таких спектров представлен на Рис.1. В спектре доминируют две линии: экситона (X) и отрицательного триона (T). Выяснилось, что энергетическое расщепление между этими линиями зависит не только от V_g , что было ожидаемо, но и от температуры, что до сих пор не проверялось. Установлено, что с ростом температуры расщепление между линиями увеличивается от 25 до 31 мэВ.

Обнаруженный эффект объясняется зависимостью расщепления между линиями экситонов и трионов от плотности электронного газа в монослое. Согласно работе [1], излучательная рекомбинация трионов сопровождается передачей импульса триона электрону отдачи, который не может быть менее фермиевского. Изменение величины энергии Ферми, а значит, и фермиевского импульса с T и V_g приводит к наблюдаемой эволюции спектров ФЛ [1]. Было оценено, что с изменением температуры от 4 К до 107 К, плотность носителей заряда в монослое изменяется на величину порядка 10^{11} см^{-2} .

Литература

[1] Glazov M. M., J. of Chemical Physics. 2020. v. 153(3):034703.

Расчет структуры мультиплетов $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$ и $^4I_{11/2}$ иона эрбия Er^{3+} в оптических световодах

А. Охрименко,* Ю.М. Белоусов

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

**e-mail: okhrimenko.a@phystech.edu*

Термы иона эрбия Er^{3+} , легированного в кварцевое стекло SiO_2 , расщепляются в результате эффекта Штарка, обусловленного электрическим полем, создаваемым атомами стекла. Энергетический спектр и расщепление термов иона Er^{3+} в кристаллах были рассчитаны теоретически ещё на первых стадиях исследований, однако в аморфном стекле подобные расчеты не проводились. В частности, данная задача для Er^{3+} в кристаллических структурах была решена в работе [1] с учетом наличия вложенных симметрий. Задача в стекле отличается, поскольку даже в ближнем порядке не наблюдается регулярной структуры.

Между тем оптические световоды, которые находят самое широкое применение в устройствах передачи информации, представляют из себя аморфное кварцевое стекло. Поэтому теоретический расчет расщепления термов Er^{3+} в аморфном стекле представляется актуальным, в частности, для определения ширин спектральных линий и кинетики распространения излучения в световоде.

В данной работе был произведен расчет Штарковского расщепления первых трех термов ионов эрбия Er^{3+} в аморфном стекле SiO_2 . Показано, что основной вклад в расщепление определяется взаимодействия электрического квадрупольного момента эрбия с градиентом электрического кристаллического поля стекла. В этом случае взаимодействие определяется двумя феноменологическими параметрами, которые могут быть восстановлены из сравнения результатов теоретического расчета с экспериментально измеренным спектром. Также было показано, что основной вклад в расщепление термов вносит аксиально симметричная часть взаимодействия. В этом случае расщепление будет описываться только одним параметром. Результаты теоретического расчета хорошо согласуются с наблюдаемыми экспериментальными данными как в стекле, так и в кристалле [2, 3] и при этом позволяют определить параметры взаимодействия с кристаллическим полем.

Литература

- [1] Dammak, M., and De-Long Zhang. Spectra and energy levels of Er^{3+} in Er_2O_3 powder, Journal of alloys and compounds 407.1-2 (2006).
- [2] Huang, Y. D., M. Mortier, and F. Auzel. Stark levels analysis for Er^{3+} -doped oxide glasses: germanate and silicate, Optical Materials 15.4 (2001).
- [3] Gruber, J. B., et al. Energy levels of single-crystal erbium oxide, The Journal of Chemical Physics 45.2 (1966).

Высокоточная однопиксельная классификация объектов для терагерцового диапазона

А.Ю. Осичева^{1*} А.Ю. Шахматов,¹ Д.В. Сыч²

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

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

*e-mail: osicheva.aiu@phystech.edu

Получение информации об объектах с использованием терагерцового излучения нашло множество применений в различных областях, включая медицину и системы безопасности. Однопиксельный подход [1] позволяет существенно упростить практическую реализацию таких систем и при этом может применяться для решения конкретных задач, в частности, классификации объектов. В данном подходе детектором без пространственного разрешения измеряется интегральное перекрытие световых паттернов специальной пространственной структуры с объектом, что позволяет получать пространственную информацию. Цель данной работы заключается в исследовании решения задачи распознавания объектов в рамках однопиксельного подхода с применением нейронных сетей на примере классификации рукописных цифр, а также перспектив распространения такого подхода на терагерцовый диапазон излучения.

Классификация цифр проводится с помощью полносвязной нейронной сети. Входной слой нейросети размером 200 содержит структуру световых паттернов. Модель была обучена на полном датасете MNIST. Для применения в терагерцовом диапазоне мы предлагаем схему, представленную на рис. 1.

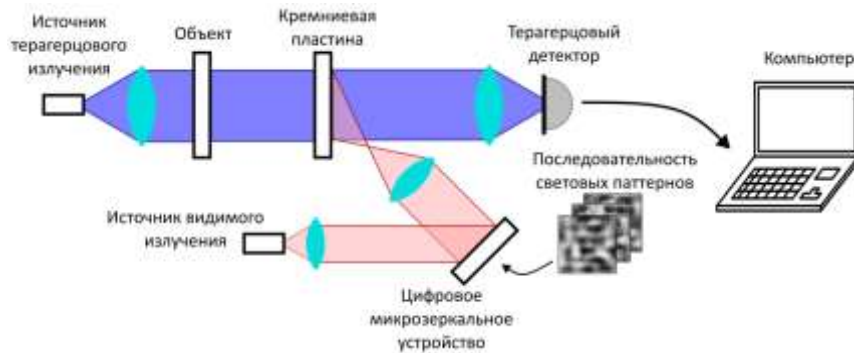


Рис. 1. Схема экспериментальной реализации однопиксельного подхода в терагерцовом диапазоне [2]. Световые паттерны формируются за счёт эффекта фотовозбуждения с помощью цифрового микрозеркального устройства, проецирующего свет на кремниевую пластину.

В результате мы провели компьютерное моделирование разработанного нами алгоритма и показали, что он достигает точности классификации рукописных цифр 94% на тестовой выборке. Данный алгоритм может быть реализован в схеме однопиксельной визуализации в терагерцовом диапазоне.

Литература

- [1] A. Osicheva and D. Sych, Sensors 24(14), 4689 (2024).
- [2] R.I. Stantchev, X. Yu, T. Blu, et al. Nature Communications 11, 2535 (2020).

Портативный спектрометр с детектором на основе линейки фотодиодов для регистрации комбинационного рассеяния

М.Э. Парфёнов,* Д.Н. Артемьев, Д.В. Корнилин

Самарский университет, 443086, Самарская обл., Самара, ул. Московское шоссе, д.34

**e-mail: m.parfyonov@icloud.com*

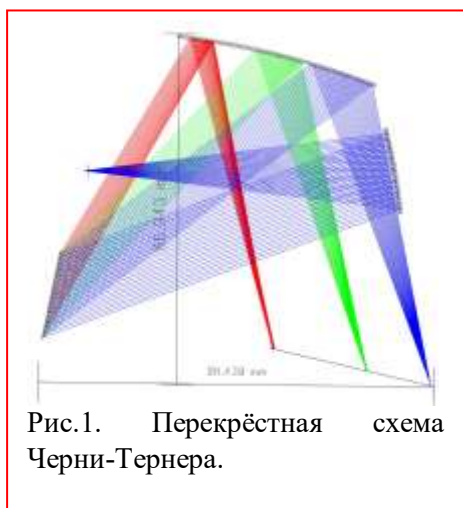


Рис.1. Перекрёстная схема Черни-Тёрнера.

Разработка компактного спектрометра с фотодиодным детектором обусловлена потребностью в портативной системе для оперативной идентификации веществ в полевых условиях.

При моделировании (в вычислительном пакете трассировки лучей) использовалась компактная и эффективная схема Черни-Тёрнера. С целью достижения портативности была применена перекрёстная компоновка элементов (см. рисунок 1). Для уменьшения сферических aberrаций использовались параболические зеркала с серебряным покрытием.

Выбранный для моделирования диапазон длин волн находился в пределах от 800 до 920 нм. Указанная область спектра характеризуется низкой

интенсивностью флуоресценции или полным её отсутствием, что делает её оптимальной для спектроскопических измерений. В оптической схеме использовалась дифракционная решётка с 1600 линиями на мм, а в качестве детектора использовалась линейка фотодиодов с характерными размерами пикселя 4,4 x 0,75 мм [1].

После оптимизации размер пятен излучения на плоскости детектора (по ширине) не превышал 750 мкм (0,75 мм). Указанные размеры превышают требования, предъявляемые к ПЗС-детекторам, однако являются приемлемыми для фотодиодных систем, т.к. такие системы обладают большими активными областями детектирования (у каждого пикселя) и соседние пиксели не засвечиваются.

Геометрические размеры схемы после оптимизации не превышали 87 x 98,5 мм.

После расположения элементов была произведена трассировка лучей, в ходе которой оказалось, что спектральное разрешение системы составляет порядка 4,5 нм (что соответствует рамановскому сдвигу в 60,53 см⁻¹). Несмотря на то, что это значение уступает показателям ПЗС-систем, оно остаётся достаточным для идентификации широкого круга веществ, включая органические соединения и минералы [2].

Таким образом, предложенная оптическая схема портативного спектрометра с фотодиодным детектором демонстрирует высокую эффективность при компактных размерах (87 x 98,5 мм), что делает её особенно пригодной для мобильных и полевых применений, где важны лёгкость, автономность и простота эксплуатации.

Литература

[1] Hamamatsu Web Site [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiode-array/si-photodiode-array/S4111-46Q.html> (02.03.2025)

[2] Минералогическое общество Америки. Рамановская спектроскопия для идентификации минералов: Практическое руководство / Минералогическое общество Америки. — Вашингтон, 2024. — 99 с.

Разработка многопиксельного детектора фотонов на основе сверхпроводящих проволок

М.М. Протовых,* Г.Б. Лесовик

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

**e-mail: prutovykh.mm@phystech.edu*

Квантовое распределение ключей (QKD) — важная технология защищённой связи в эпоху квантовых вычислений, однако её масштабирование ограничено потерями в канале, а реализация квантовых повторителей остаётся недостижимой. Альтернативные схемы с оптическими усилителями требуют точного детектирования слабых сигналов [3]. Основным кандидатом для этих задач являются сверхпроводящие нанопроволочные детекторы одиночных фотонов (SNSPD), впервые продемонстрированные в 2001 году [2]. Они обладают высокой чувствительностью, низким уровнем шумов и высокой частотой счёта, но не позволяют различать число фотонов в импульсе.

Для реализации этой возможности требуется использование схем мультиплексирования, например, последовательного соединения нанопроволок [4], однако её эффективность ограничивается шумами и неидеальностью статистики распределения фотонов по пикселям. Для сохранения высоких характеристик детектора в условиях ограниченной доступности технологий и достижения разрешения числа фотонов предложена адаптированная схема детектора.

Шумы от шунтирующих сопротивлений и считывающего оборудования, могут быть существенно подавлены с помощью линейных фильтров. Для количественной оценки предельного числа различимых фотонов нами проводится моделирование амплитуд отклика системы в LT SPICE [1], где изучается динамика последовательного соединения сверхпроводящих проволок.

Неидеальность распределения фотонов между пикселями также подлежит анализу. С помощью метода Монте-Карло моделируется неравномерная засветка активной области, что позволяет определить распределение числа сработавших пикселей. Это, в свою очередь, даёт возможность построить численный алгоритм восстановления среднего числа поглощённых фотонов и его стандартного отклонения.

Предлагаемый подход позволяет оценить перспективность различных архитектур детекторов и выбрать наиболее рациональные пути их оптимизации для задач квантовой криптографии.

Литература

- [1] K.K. Berggren et al., A superconducting nanowire can be modelled by using SPICE, Superconductor Science and Technology Vol. 31. № 5. – P. 055010 (2018)
- [2] G.N. Gol'tsman et al., Picosecond superconducting single-photon optical detector, Applied Physics Letters Vol. 79. № 6. – P. 705-707 (2001)
- [3] N.S. Kirsanov et al., Forty Thousand Kilometers Under Quantum Protection, Scientific Reports Vol. 13. № 1. – P. 8756 (2023)
- [4] F. Mattioli et al., Photon-counting and analog operation of a 24-pixel photon number resolving detector based on superconducting nanowires, Optics Express Vol. 24. № 8. – P. 9067 (2016).

Мультимаркерная спектральная система защиты жидкостей от контрафакта

Т.Е. Пылаев,^{1*} В.И. Кукушкин²¹ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского Минздрава России, 410012, Саратовская обл., г. Саратов, ул. Большая Казачья, 112²Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

*e-mail: pylaevte@gmail.com



Рис.1. Принцип SERS T&T спектральной системы защиты жидкостей, внешний вид коллоидного раствора и электронно-микроскопическое изображение маркерных наноразмерных ГКР-меток.

Проблема незаконной торговли контрафактной и фальсифицированной продукцией приобретает глобальный характер и катастрофические масштабы в последние годы, с учетом текущей изменившейся геополитической обстановки. Согласно мировым оценкам Интерпола, ежегодный доход от торговли контрафактной продукцией составляет порядка 500 млрд. евро.

Создание и внедрение высокоинтеллектуальных систем противодействия обороту контрафактной и фальсифицированной продукции является задачей государственного масштаба. В частности, крайне актуальной является разработка и совершенствование комплексных систем технической защиты и способов отслеживания подлинности продукции (т.н. системы track&trace, T&T). Известны криптографические системы защиты на уровне кодировок на физических и электронных носителях, а также системы защиты упаковки товара в виде одно- и двумерных кодов. К другой группе относят физико-химические системы защиты – непосредственно отвечающие за идентификацию подлинности самого товара. Последние заключаются в применении специальных комбинаций молекулярных, нано- и микроразмерных меток (красителей, люминофоров и пр.), обнаруживаемых только измерительными приборами, и никаким образом не влияющих на свойства защищаемого продукта. Недостаточная чувствительность, фотохимическая нестабильность, а также автофлуоресценция самого продукта, наряду с высокой стоимостью измерительных приборов и требованиями специальных навыков оператора, накладывают принципиальные ограничения на спектральные системы защиты жидкостей на основе люминофоров. В качестве перспективной альтернативы мы предлагаем систему защиты жидкостей на основе ультрачувствительных, стабильных меток гигантского комбинационного рассеяния (ГКР, в англ. SERS) и неразрушающего портативного экспресс-метода спектральной верификации. Настоящее исследование нацелено на разработку и всесторонние испытания возможностей SERS-T&T технологии на основе синтезированных нами маркеров наноразмерных ГКР-меток по оригинальным методикам жидкофазной химии, для защиты различных экономически-значимых жидкостей: автомобильного и авиационного топлива и ГСМ, косметической и парфюмерной продукции и пр.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках проекта Государственного задания Минздрава РФ, № госрегистрации 124020300001-9.

Плазмоны в двумерной электронной системе в форме диска с анизотропией массы носителей заряда

Д.А. Родионов,^{1,2*} И.В. Загороднев¹

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая 11/7*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9*

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

В работе теоретически исследованы свойства магнитоплазменных колебаний в диске с двумерным электронным газом, обладающим анизотропией массы носителей заряда. Такие системы, например, на основе напряженных квантовых ям AlAs/AlGaAs [1], представляют интерес для эксперимента [2]. Вся система помещена в постоянное однородное магнитное поле, вектор индукции B которого перпендикулярен плоскости электронного газа. Проводимость такой системы рассматривалась в рамках анизотропной модели Друде. Через m_1 и m_2 обозначим эффективную массу электрона вдоль главных осей тензора эффективных масс и положим $m_1 > m_2$. Под двумерной электронной системой на расстоянии d расположен идеально проводящий плоский металлический электрод, причём расстояние между двумерной системой и электродом много меньше характерного планарного размера системы и длины волны плазменных колебаний.

Показано, что плазменные колебания в анизотропном диске эквивалентны плазменным колебаниям в изотропной двумерной системе в форме эллипса. К новой геометрии можно перейти растяжением по одной главной оси в $\sqrt[4]{m_1/m_2}$ раз и сжатием во столько же раз по другой главной оси. При этом проводимость полученной системы будет описываться изотропной моделью Друде с заменой эффективных масс m_1 , m_2 на их среднее геометрическое $\sqrt{m_1 m_2}$. Установлена зависимость частоты плазменных колебаний от отношения эффективных масс m_1/m_2 . Показано, что из-за нарушения круговой симметрии происходит снятие вырождения по знаку орбитального числа плазменной моды. При ненулевом магнитном поле численно построена зависимость частоты от величины магнитного поля. С увеличением магнитного поля частота более высокой моды среди расщепившихся по знаку орбитального числа стремится к циклотронной частоте, а частота нижней – к ненулевому асимптотическому значению.

Также показано, что учет электромагнитного запаздывания может быть легко произведен «увеличением» эффективных масс электрона на величину $\delta m = 4\pi d n_s e^2 / c^2$, где n_s , e – двумерная концентрация и заряд носителей заряда, а c – скорость света в вакууме. С ростом роли электромагнитного запаздывания добавка δm возрастает, что уменьшает отношение увеличенных масс m_1/m_2 и может привести к смене порядка следования мод в диске по частоте друг за другом.

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» № 21-1-5-133-1.

Литература

[1] A. Nemilentsau, T. Low, G. Hanson, Physical Review Letters 116, 066804 (2016).

[2] A.R. Khisameeva, V.M. Muravev, I.V. Kukushkin, Applied Physics Letters 117, 093102 (2020)

Применение алгоритма переноса поляризации в органических молекулах с неэквивалентными связанными спинами

Д.Р. Сафин,* Ю.М. Белоусов

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

**e-mail: safin.dr@phystech.edu*

Методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) получен перенос поляризации между тремя $1/2$ ядерных спинов в специально приготовленной изотопно обогащенной молекуле диэтилфталимида малоната- $2\text{-}^{13}\text{C}, ^{15}\text{N}$ (см. [1]). Перенос поляризации осуществлялся с помощью последовательности радиочастотных импульсов и интервалов ожидания из [2], модифицированной с помощью техники спинового эха. В образцах молекул с природными и обогащенными изотопами ^{13}C и ^{15}N были измерены времена релаксации и спектры ЯМР для исследуемых ядер. Полученный перенос поляризации с ^1H на ^{15}N сокращает экспериментальное время, необходимое для измерения очень большого времени релаксации ядра с малым магнитным моментом, примерно в 10^3 раза по сравнению со стандартными методами ЯМР. Кинетические процессы в системе моделировались в соответствии с [3] (см. Рис. 1).

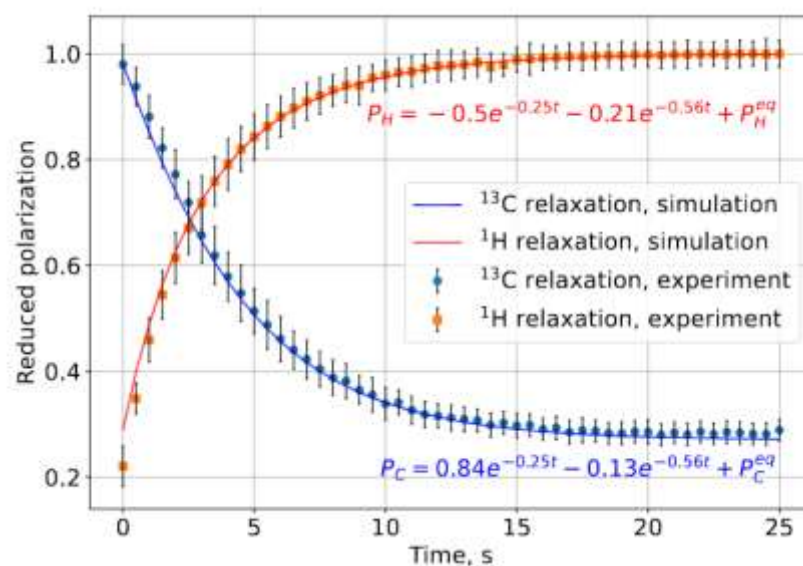


Рис. 1. Продольная поляризация ядерных спинов ^1H и ^{13}C после применения последовательности SWAPHС и её симуляция.

Литература

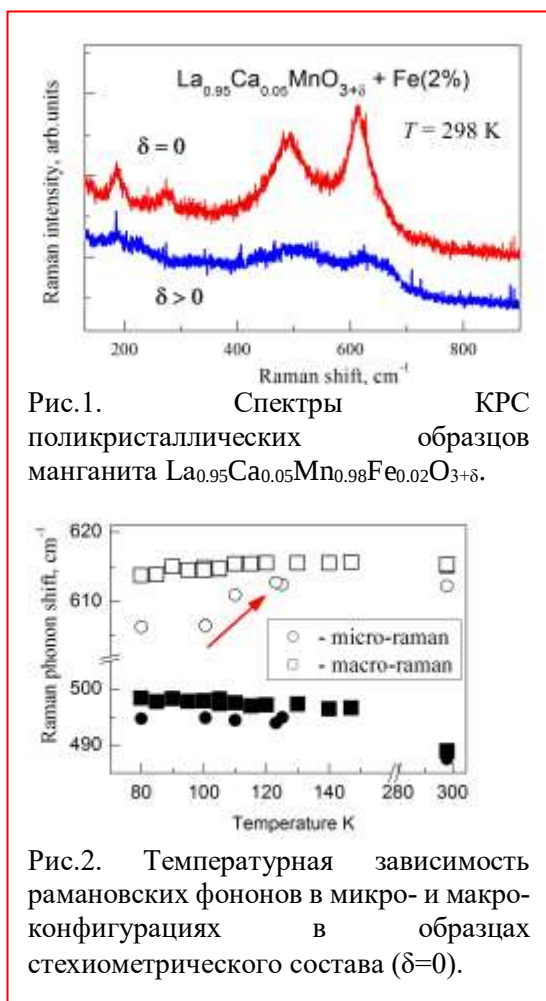
- [1] Jonathan A. Jones. Controlling NMR spin systems for quantum computation // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 140–141 (2024), p. 49-85
- [2] K. Micadei and J.P.S. Peterson and A.M. Souza and R.S. Sarthour and I.S. Oliveira et al. Reversing the direction of heat flow using quantum correlations // Nature Communications, 10 (2019)
- [3] I. Solomon. Relaxation Processes in a System of Two Spins // Phys. Rev. 99 (1955), p. 599-565

Комбинационное рассеяния света в слаболегированных манганитах (La,Ca)Mn_{0.98}Fe_{0.02}O₃

С.В. Зайцев, В.Д. Седых,* К.П. Мелетов

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

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



Методом комбинационного рассеяния света (КРС) исследованы полученные золь-гель методом поликристаллические образцы манганита лантана La_(1-x)Ca_xMn_{0.98}Fe_{0.02}O_{3+δ} (x = 0.05, 0.10, 0.20), [1]. В спектрах КРС (лазер 532 нм) наблюдаются несколько сильных линий оптических фононов $\nu_1 \sim 495 \text{ cm}^{-1}$ и $\nu_2 \sim 610 \text{ cm}^{-1}$, которые сильнее выражены в образцах орторомбической фазы стехиометрического состава (δ=0) после отжига в вакууме (рис.1). Изучение температурных зависимостей наиболее сильных ЛО-фононов в микро-конфигурации (диаметр сфокусированного лазерного пятна $\sim 3 \text{ }\mu\text{m}$, мощность $\sim 500 \text{ }\mu\text{W}$) показало, что с ростом температуры происходит заметный синий сдвиг линии ν_2 на $\Delta\nu_2 \approx 6 \text{ cm}^{-1}$ при $T = 100\text{--}120 \text{ K}$ (micro-raman, рис.2). Что наиболее важно, такое “аномальное” поведение наблюдается только в небольшом количестве зёрен поликристаллического порошка (<20%), а в макроскопической конфигурации КРС (размер лазерного пятна $\sim 50 \times 100 \text{ }\mu\text{m}$, мощность $\sim 20 \text{ mW}$) «аномальное» поведение не проявляется совсем (macro-raman, рис.2). Наблюдаемую разницу можно объяснить существенной неоднородностью при отжиге в вакууме поликристаллических образцов. Кроме того, детальные мессбауэровские, рентгеновские

и магнитные исследования указывают на фазовое расслоение и двухфазное ферромагнитное–антиферромагнитное упорядочение в стехиометрических образцах при низких температурах ($T < 140 \text{ K}$) [1]. «Аномальное» поведение, наблюдаемое в отдельных гранулах поликристаллических образцов, объясняется сильной связью спиновой и фононной систем ниже температуры магнитного упорядочения [2].

Литература

- [1] Д. И. Пчелина, И. Ю. Медвецкая, Н. И. Чистякова, В. С. Русаков, В. Д. Седых, Ю. А. Алехина, ПОВЕРХНОСТЬ, № 6, с. 3–9 (2019).
- [2] M. N. Iliev, M. V. Abrashev, A. P. Litvinchuk, V. G. Hadjiev, H. Guo, and A. Gupta, Phys Rev. B 75, 104118 (2007).

Время отклика плазмонного детектора на основе кремния

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

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

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

В сфере телекоммуникационных технологий ключевым параметром выступает скорость передачи данных, которая во многом определяется возможной максимальной частотой модуляции излучения. При этом возможная частота модуляции естественным образом ограничена несущей частотой излучения. Именно эта особенность обуславливает повышенный интерес к субтерагерцовому частотному диапазону в данной области науки и техники.

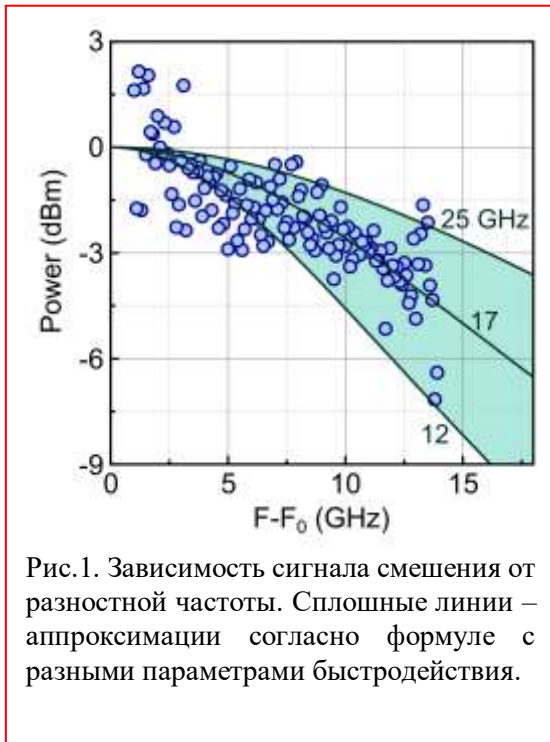


Рис.1. Зависимость сигнала смешения от разностной частоты. Сплошные линии – аппроксимации согласно формуле с разными параметрами быстродействия.

Увеличение частоты модуляции, а вместе с тем и улучшение скорости передачи информации, возможно лишь при условии наличия достаточно быстрых детекторов субтерагерцового частотного диапазона. Таким образом, исследование времени отклика таких детекторов представляет собой крайне важную и актуальную задачу. Отметим еще один важный аспект – такие детекторы должны быть совместимы с современными технологическими цепочками и работать при комнатной температуре. В работе было исследовано время отклика плазмонного детектора электромагнитного излучения на основе кремния. Для этого были проведены эксперименты по смешиванию в микроволновом частотном диапазоне. При этом чувствительный элемент детектора был встроен в щели согласованного копланарного волновода.

Были измерены основные характеристики полученного детектора в копланарном исполнении – частотные зависимости напряжения на выходе детектора, а также отражение излучения от входа получившейся сборки. Для проведения экспериментов по смешиванию на образец с помощью рупорной антенны подавалось дополнительное излучение с частотой 15 ГГц. В условиях двухчастотного возбуждения на выходе детектора появлялся сигнал на разностной частоте. Зависимость сигнала смешивания от разностной частоты показана на рисунке 1. Для сигнала смешивания детектора с полосой f_0 , которая и определяет быстродействие детектора, можно ожидать следующей зависимости: $V=V_0/(1+f^2/f_0^2)$. Аппроксимация сигнала по данной формуле показана на рисунке 1 сплошными линиями для трех разных значений f_0 в 12, 17 и 25 ГГц.

По затуханию амплитуды сигнала смешивания на разностной частоте было оценено время отклика $\tau=60\pm 10$ пс.

Время-разрешенный микроволновый отклик 2D электронной системы

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

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

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

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

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

Экспериментальное изучение процессов релаксации спиновых и зарядовых возбуждений в различных двумерных электронных системах представляет собой одну из важнейших задач современной физики конденсированного состояния. С фундаментальной точки зрения, анализ времен жизни таких возбуждений позволяет получить ценную информацию об устройстве электронной системы, в том числе и при ультранизких температурах, и в больших магнитных полях. С прикладной точки зрения, определение основных каналов рассеяния неравновесной спиновой поляризации, например, играет ключевую роль в создании прототипов приборов в рамках спиновой электроники.

В данной работе представлена схема измерения транспортного отклика двумерной электронной системы на короткие импульсы микроволнового излучения с разрешением по времени.

В качестве объекта исследования была выбрана Si/SiGe квантовая яма. В такой структуре подавленное спин-орбитальное взаимодействие обуславливает длинные времена спиновой релаксации. На поверхность образца был нанесен согласованный копланарный волновод, в щелях которого находилась двумерная электронная система. Таким образом, мы имели возможность измерять высокочастотную проводимость и ее изменение при поглощении дополнительных возбуждающих импульсов излучения частотой ~ 100 ГГц по пропусканию этого волновода. Все измерения проводились в гелиевом криостате, оснащенном сверхпроводящим соленоидом, при температуре 1.5 К и в магнитных полях до 10.

Предложенный подход позволил пронаблюдать затухание сигнала спинового резонанса по времени и оценить характерное время спин-решеточной релаксации в системе. Измеренное время достаточно слабо зависело от значения фактора заполнения системы в режиме квантового эффекта Холла и составляло примерно 1.7 мкс.

Поперечные плазмон-поляритоны в «тонкой структуре» циклотронного резонанса в экранированном двумерном электронном газе

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

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

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9*

*e-mail: shinko.is@phystech.edu

Циклотронный резонанс (ЦР) – классический эффект, с помощью которого можно исследовать зонную структуру полупроводников. В высокоподвижных двумерных электронных системах (ДЭС) недавно было обнаружено его расщепление на отдельные пики, соответствующие размерным магнитоплазменным модам [1]. При этом вблизи циклотронной частоты наблюдалась общая огибающая этих гармоник. Данная работа, опирается на последние теоретические [2] и экспериментальные [3] результаты касательно поперечных плазмон-поляритонов в экранированных ДЭС и ставит своей целью исследование природы огибающей ЦР.

Исследовались две гетероструктуры с одиночной квантовой ямой на основе GaAs/AlGaAs в геометрии диска диаметром 3 мм и толщиной диэлектрического слоя 160 мкм. На задние грани образцов были нанесены соответственно затвор и СВЧ-поглотитель. Измерения проводились в гелиевом криостате со сверхпроводящим магнитом.

Микроволновое поглощение детектировалось с помощью оптической методики. К образцу подводился луч лазера с длиной волны 780 нм, через тот же световод собирался сигнал рекомбинационной фотолюминесценции двумерных электронов. Одновременно с лазером на образец подавалось микроволновое излучение в интервале частот от 10 ГГц до 150 ГГц. При фиксированной частоте снималась зависимость микроволнового поглощения от величины магнитного поля. Полученные кривые качественно повторяют наблюдаемую прежде картину «тонкой структуры» в системе без затвора. По ним удалось определить положения отдельных резонансов. Анализ магнитодисперсии позволил найти плазменные частоты для первых двух размерно-квантованных объемных мод в диске, которые находятся в согласии с теорией [4].

Определение положений общей огибающей продольных размерных магнитоплазменных мод осуществлялось методом центра масс. Дальнейшее изучение их магнитодисперсии и ее сопоставление с аналитическим выражением [2] позволяют заключить, что данная мода соответствует поперечному магнитоплазменному резонансу в образце с задним затвором и несмещенному циклотронному резонансу в системе с поглотителем.

Литература

- [1] V. M. Muravev *et al.*, Phys. Rev. B, 93 (4), 041110 (2016).
- [2] A. A. Zabolotnykh, V. A. Volkov, Phys. Rev. B 103, 125301(2021).
- [3] V. M. Muravev *et al.*, Phys. Rev. B 110, 205416 (2024).
- [4] A. L. Fetter, Phys. Rev. B 33, 5221 (1986).

Субтерагерцовый амплитудный модулятор на основе кремниевого PIN-диода

М.С. Соколова,^{1,2*} А.А. Титенко,¹ С.М. Макаровская, В.Д. Бобова,¹ И.В. Кукушкин,¹ В.М. Муравьев¹

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

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

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

Терагерцовая и субтерагерцовая квазиоптика имеют широкое практическое применение в различных системах неразрушающего контроля, детектирования веществ и контроля безопасности. Применение субтерагерцовых волн в системах передачи данных повысило потребность в эффективной амплитудной модуляции сигналов. Существующие устройства, однако, не обладают достаточными характеристиками - глубиной модуляции, быстродействием, шириной модулируемой полосы.

В данной работе представлены результаты по разработке, оптимизации и изготовлению субтерагерцовых амплитудных модуляторов. Устройство представляет собой PIN-диод на основе плоскопараллельной пластины $1 \times 1 \text{ см}^2$ из высокорезистивного кремния, легированного с обеих сторон. На обеих сторонах также нанесена сетка, изображенная на рис. 1, с периодом $a = 800 \text{ мкм}$ и шириной золота $w = 700 \text{ мкм}$. Напряжение подается на контакты с обеих сторон диода. За счет нелегированного I-слоя, в котором изначально концентрация носителей очень низкая, при подаче напряжения происходит перераспределение концентрации электронов во всем диоде, что приводит к изменению электродинамических характеристик метаматериала и к модуляции проходящего через него электромагнитного излучения, что показано на рис.2.

Путем перебора сеток и концентрации электронов в p и n областях достигнута модуляция -17.9 дБ на частоте 152.4 ГГц. Экспериментальные данные хорошо согласуются с численным моделированием в среде Ansys HFSS.

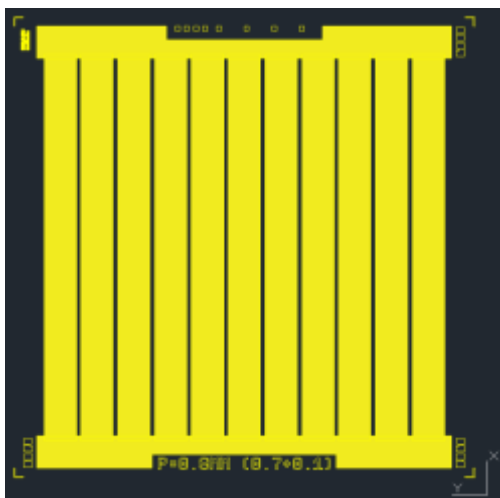


Рисунок 1. Схематичное изображение PIN-модулятора. Период $a = 800 \text{ мкм}$, ширина сетки $w = 700 \text{ мкм}$, толщина чипа $d = 200 \text{ мкм}$, толщина металлизации $h = 0.5 \text{ мкм}$.

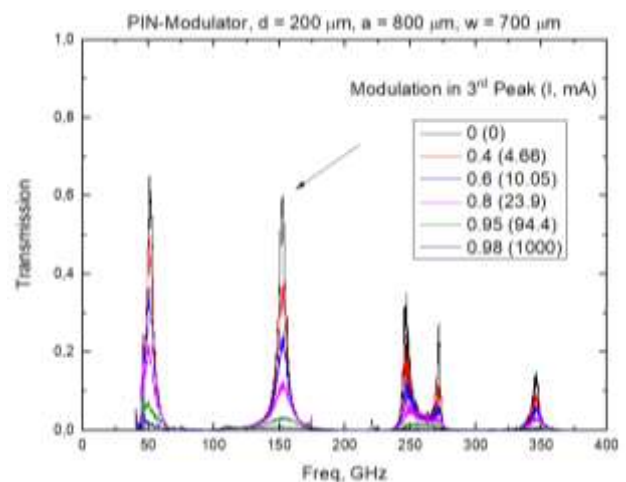


Рисунок 2. Спектр пропускания излучения в диапазоне 40-375 ГГц при подаче на модулятор токов 0-1 А.

Спектроскопия комбинационного рассеяния как метод диагностики сахарного диабета

А.Ю. Субекин, В.И. Кукушкин,^{1*} Т.Д. Рудаков,¹ Е.В. Рудаков,¹ С.В. Дубков²

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

²*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1*

*e-mail: kukushvi@mail.ru

Сахарный диабет является одним из самых распространенных заболеваний эндокринной системы. Различные его типы диагностируют у, примерно, 8% людей [1, 2]. Своевременная диагностика диабета и контроль за уровнем сахара крови позволяют оказать грамотное симптоматическое лечение и повысить уровень жизни каждого пациента.

В предыдущем исследовании нами показана возможность количественного определения гемоглобина крови с использованием обычной и поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния (КР и ГКР) [3].

В представленной работе изучена возможность определения гликированного гемоглобина методом ГКР. На рисунке 1 представлена зависимость ГКР-сигнала от концентрации этого белка в крови человека.

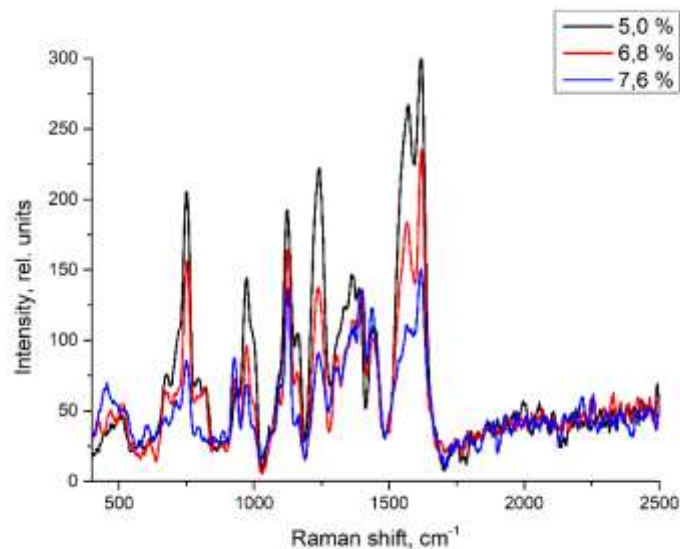


Рис. 1. Зависимость интенсивности ГКР-сигнала от концентрации гликированного гемоглобина.

Из представленных данных видно, что интенсивность сигнала белка имеет обратную зависимость от его сигнала. Механизм этого явления будет более подробно исследован в наших последующих работах.

Литература

- [1] Centers for Disease Control and Prevention. National Diabetes Fact Sheet: national estimates and general information on diabetes and prediabetes in the United States. 2011.
- [2] Brownlee M. Nature. 2001; 414:813–820.
- [3] Subekin A.Yu. et al. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2025. V. 89. 2. P. 240–248.

Субтерагерцовый амплитудный модулятор с перестраиваемой метаповерхностью

А.А. Титенко,^{1*} С.М. Макаровская,¹ В.В. Соловьев,¹ М.С. Соколова,^{1,2} В.Д. Бобова,¹ И.В. Кукушкин,¹ В.М. Муравьев¹

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

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

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

За последние несколько десятилетий значительно расширились исследования в миллиметровом диапазоне длин волн. Использование субтерагерцовых волн для передачи данных и систем визуализации привело к высокому спросу на амплитудную модуляцию сигнала. Однако современные активные устройства, включая модуляторы, все еще не могут полностью удовлетворить требованиям измерительных систем (потери пропускания, глубина модуляции, быстродействие, частота модуляции и т.д.). Гетероструктуры на основе нитрида галлия могут поддерживать наноразмерные двумерные электронные системы (ДЭС) с высокой концентрацией носителей и подвижностью и обеспечивают новый способ разработки активных СВЧ-устройств.

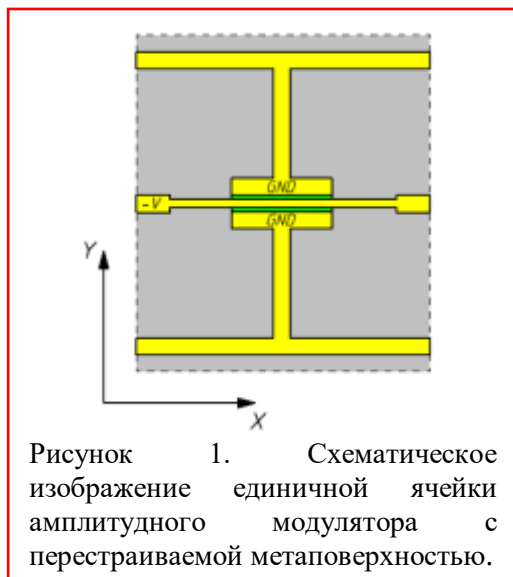


Рисунок 1. Схематическое изображение единичной ячейки амплитудного модулятора с перестраиваемой метаповерхностью.

В данной работе представлен прогресс по разработке, оптимизации и изготовлению субтерагерцовых амплитудных модуляторов (рис.1, 2) с перестраиваемой метаповерхностью. В полупроводниковой структуре на базе гетероперехода GaN/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN образуется двумерный электронный слой за счёт спонтанной и пьезоэлектрической поляризации данного материала с концентрацией электронов $n_0 = 1,21 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Перестройка этой концентрации напряжением на затворе приводит к изменению электродинамических характеристик метаповерхности и, как следствие, к амплитудной модуляции проходящего через метаповерхность электромагнитного излучения (рис. 3).

Данная структура является резонансной на частоте работы модулятора для уменьшения потерь в пропускании.

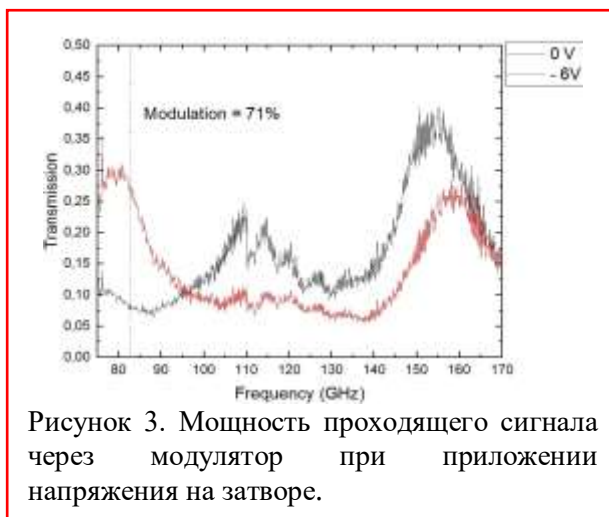


Рисунок 3. Мощность проходящего сигнала через модулятор при приложении напряжения на затворе.

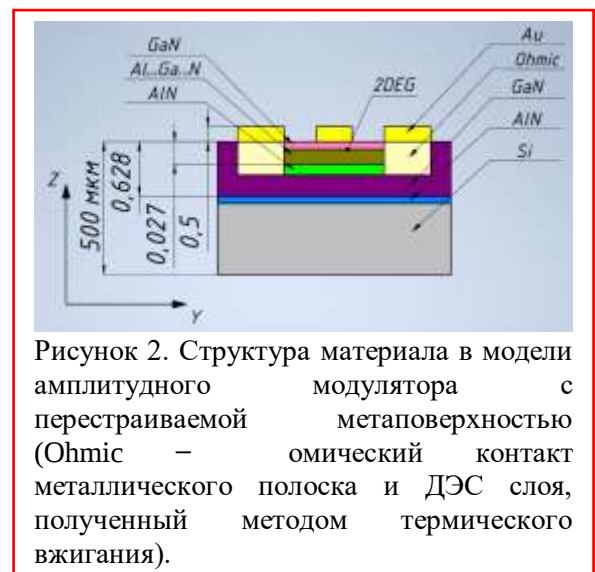


Рисунок 2. Структура материала в модели амплитудного модулятора с перестраиваемой метаповерхностью (Ohmic — омический контакт металлического полоска и ДЭС слоя, полученный методом термического вжигания).

Оптическая ориентация в сильнолегированных диодных структурах InGaAs/GaAs

С.В. Зайцев*

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

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

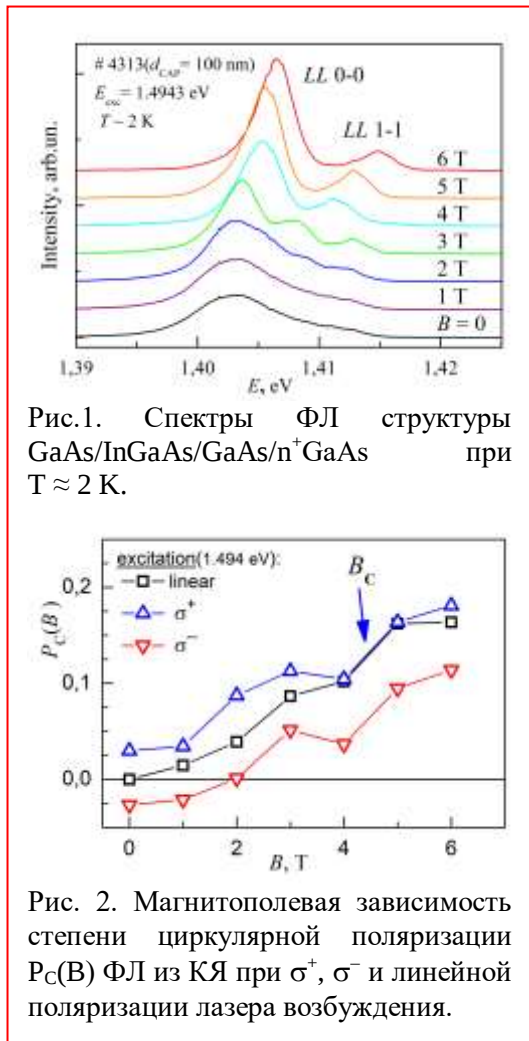


Рис.1. Спектры ФЛ структуры GaAs/InGaAs/GaAs/n⁺GaAs при T ≈ 2 К.

Рис. 2. Магнитолевая зависимость степени циркулярной поляризации $P_c(B)$ ФЛ из КЯ при σ^+ , σ^- и линейной поляризации лазера возбуждения.

Исследована оптическая ориентация в сильнолегированной диодной структуре, содержащей квантовую яму (КЯ) InGaAs/GaAs (7 нм) с покровным слоем GaAs 100 нм, выращенной методом металл-органической гидридной эпитаксии на подложке n⁺-GaAs [1]. При низких температурах T ~ 2 К широкий (> 10 мэВ) и бесструктурный спектр фотолюминесценции (ФЛ) в магнитных полях B > 2 Тл расщепляется на несколько линий, отвечающих переходам между уровнями Ландау (УЛ) электронов в КЯ и фотовозбуждённых дырок LL 0-0, 1-1 (рис. 1). Исчезновение LL с v = 2 при B_c ~ 4 Тл отвечает прохождению уровня Ферми электронов между УЛ v = 1 и v + 1 = 2, что позволяет оценить их концентрацию в КЯ $n^{2D} = 2(v+1)eB/(2\pi\hbar) \approx 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Возбуждение КЯ с правой (σ^+) или левой (σ^-) циркулярной поляризациями и $E_{\text{exc}} = 1.4943 < E_g$ (GaAs) приводит к оптической ориентации фотовозбуждённых носителей (дырок) в КЯ. Так, степень циркулярной поляризации $P_c(B)$ ФЛ из КЯ выше при σ^+ и ниже при σ^- возбуждении по сравнению с $P_c(B)$ при линейной поляризации лазера, соответственно (рис. 2). Что интересно, $P_c(B)$ при σ^+ -возбуждении в поле B_c уменьшается до равновесного значения (при линейной поляризации возбуждения). Подавление оптической ориентации связывается с

практически полным заполнением нулевого (v = 0) и первого (v = 1) УЛ электронами и отсутствием «избыточных» свободных электронов, способных экранировать случайный потенциал ионизированных доноров или акцепторов в диодной структуре на подложке n⁺-GaAs [1, 2]. Такое поведение $P_c(B)$ характерно для КЯ именно при прохождении уровня Ферми электронов между УЛ [2].

Литература

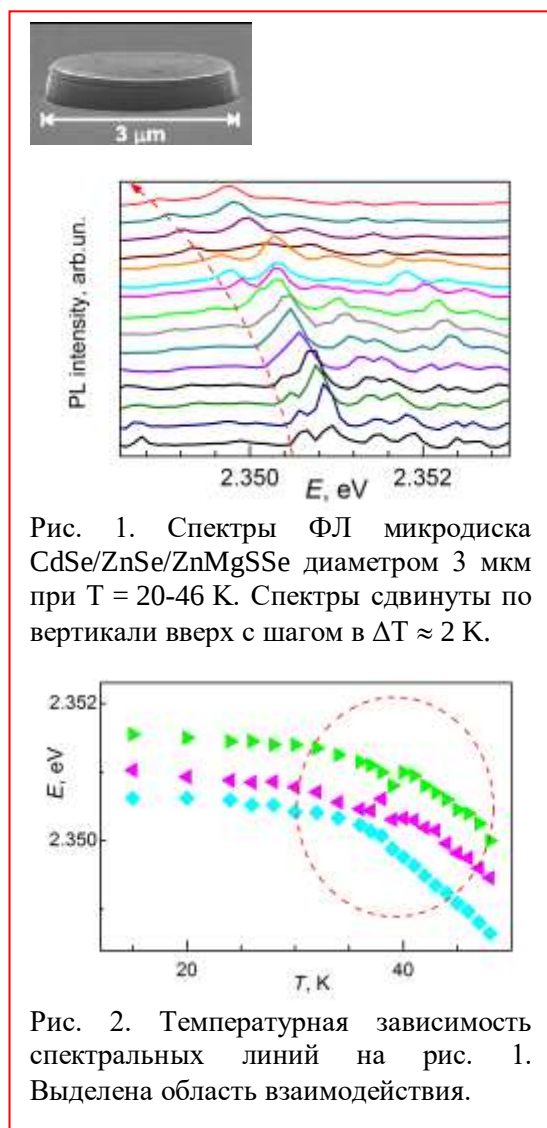
- [1] М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, В.Д. Кулаковский, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, Письма в ЖТФ 32, 46 (2006).
- [2] I.V. Kukushkin and V.B. Timofeev, Adv. Phys. 45, 147 (1996).

Люминесценция квантовых точек CdSe в микродисках ZnSe/ZnMgSSe

С.В. Зайцев*

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

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



Методом температурно-зависимой фотолюминесценции (ФЛ) при низких $T = 9\text{--}70$ К исследовалось взаимодействие квантовых точек CdSe с оптическими модами шепчущей галереи в микродисках (МД) диаметром 3 мкм (рис. 1). Микродиски высокого качества были получены путём селективного травления гетероструктур, содержащих одиночный слой квантовых точек CdSe, находящийся между волноводными слоями ZnSe/ZnMgSSe толщиной 50 нм и 60 нм, соответственно, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке GaAs (100) [1]. Квантовые точки CdSe получались при задержке роста после нанесения трёх моно-слоёв (3 ML) CdSe. После травления МД структура (см. вставку на рис.1) наклеивалась на стеклянную подложку и механически шлифовалась, а затем химически травилась до полного удаления подложки GaAs [1].

При низких температурах $T < 100$ К широкий спектр ФЛ микродиска (ширина > 50 мэВ) при $E \sim 2.35$ эВ представляет множество спектрально узких линий (~ 0.1 мэВ), отвечающих экситонным переходам в квантовых точках, и несколько более широких линий (~ 0.3 мэВ) оптических мод шепчущей галереи в микродиске (рис. 1).

Температурная зависимость группы трёх близких спектральных линий показана на рис. 2. Линии подгонялись лоренцианами с удовлетворительной точностью.

Предполагается, что центральная линия при $E \sim 2.3510$ эВ, наиболее сильная и широкая, является оптической модой шепчущей галереи в микродиске. С ростом температуры происходит красный сдвиг всех линий, а при $T \sim 38$ К наблюдается существенно немонотонное поведение, что, по-видимому, указывает на сильное взаимодействие экситона в квантовой точке с модой шепчущей галереи в микродиске (выделено на рис. 2).

Литература

[1] J. Renner, L. Worschech, A. Forchel, S. Mahapatra, and K. Brunner, Appl. Phys. Lett. 89, 091105 (2006).

Оптическая характеристика магнитных нанопроволок (GaMn)As

С.В. Зайцев*

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

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

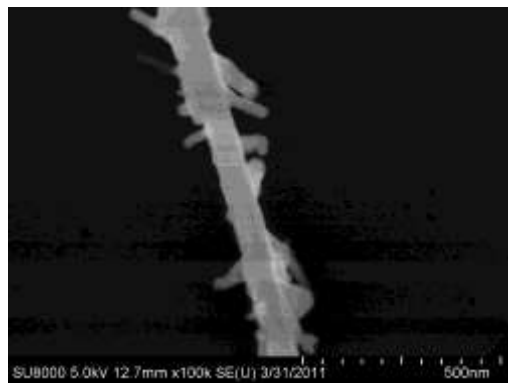


Рис. 1. ТЭМ изображение нанопроволок (GaMn)As, выращенных на подложке GaAs(111)B.

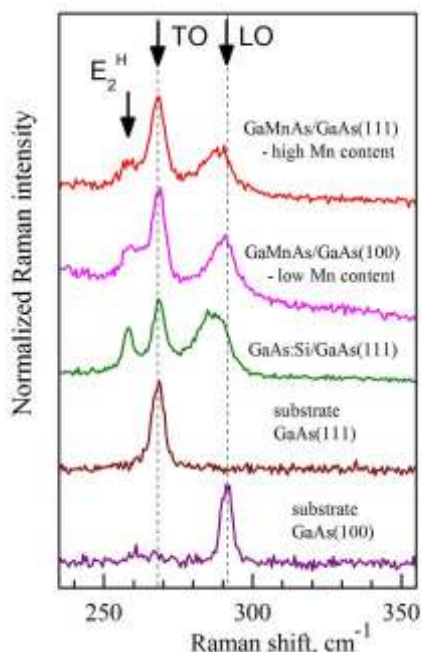


Рис. 2. Спектры КРС различных НП, выращенных на подложках GaAs(100) и GaAs(111) ($T = 300\text{ K}$).

Методом комбинационного рассеяния света (КРС) проведена оптическая характеристика немагнитных GaAs и магнитных (GaMn)As нанопроволок (НП). Исследованные НП были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в течение 15-30 минут при температурах подложки 480-660°C, при этом наноструктуры Au или Mn использовались в качестве катализатора поверх предварительно выращенного буферного слоя GaAs(111)B. Полученные НП длиной в несколько микрон имеют характерную толщину 50-200 нм и низкую плотность [1].

Спектры КРС буферного слоя GaAs(111) на рис.2 показывают наиболее сильную линию при $\sim 268\text{ cm}^{-1}$, соответствующую поперечному оптическому фонону GaAs, разрешенному в геометрии (111). Его полуширина (FWHM) $\sim 5\text{ cm}^{-1}$, по сравнению с микрокристаллами [2], свидетельствует о достаточно хорошем качестве кристаллов. Линия при $\sim 288\text{ cm}^{-1}$ соответствует продольному оптическому LO-фонону GaAs и проявляется в этой геометрии благодаря наклонной случайной ориентации НП относительно оси (111), что подтверждается визуализацией с помощью сканирующей электронной микроскопии. Особенностью почти всех НП является новая линия при $\sim 258\text{ cm}^{-1}$, обозначаемая как E_2^H . Эта линия является характерным фоном в структуре вюрцита GaAs и свидетельствует о значительной доле вюрцитной фазы в НП. Большое значение $\text{FWHM} \geq 8\text{ cm}^{-1}$ у LO-фонона, вероятно, связано с двойникованием, что требует дополнительных исследований электронной микроскопии высокого разрешения (ТЕМ).

Литература

- [1] A.D. Bouravleuv, H. Cociati, T. Ishibashi, N. Kuwano and K. Sato, J. Phys: Conf. Ser. 100, 052052 (2008).

Получение титаната бария, модифицированного оловом, для дозиметрии оптического излучения

Д.В. Белякова, * М.Д. Кружалина, А.М. Тарасов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

**e-mail: darabelakova373@gmail.com*

Точный контроль и измерение дозы ультрафиолетового и видимого излучения являются критически важными задачами в различных областях, от медицины до экологии. Материалы на основе оксидов металлов, особенно титанаты со структурой перовскита, представляют значительный интерес для создания сенсоров оптического излучения и дозиметров благодаря их уникальным фотоэлектрическим свойствам. Среди них титанат бария (BaTiO_3) является перспективным, хотя и менее изученным, кандидатом из-за его потенциальной фоточувствительности в УФ-диапазоне [1]. Повышение эффективности таких материалов возможно за счет создания наноструктур с развитой поверхностью и дополнительной модификацией, например, оловом [2]. В связи с этим целью данной работы являлся многостадийный синтез наноструктурированного титаната бария, модифицированного оловом, и исследование его оптических свойств.

Процесс синтеза включал три последовательных этапа. Первоначально методом электрохимического анодирования титановой фольги в фторсодержащем электролите были сформированы упорядоченные массивы нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ). Полученные массивы подвергались гидротермальной обработке в щелочном растворе прекурсора бария, что приводило к их преобразованию в наноструктурированный титанат бария (BaTiO_3). Затем массив модифицировался гидротермально в присутствии хлорида олова. Структура и морфология материалов на каждом этапе контролировались с помощью рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а оптические свойства и фотоотклик конечного продукта изучались методами УФ-видимой спектроскопии.

Результаты исследований подтвердили успешное формирование исходных нанотрубок НТАОТ и их последующее преобразование в фазу BaTiO_3 со структурой перовскита, что было установлено по данным РФА. Финальный продукт был идентифицирован как титанат бария, модифицированный оловом (Sn-BaTiO_3), что было показано с помощью спектроскопии комбинационного рассеивания света. Таким образом, в работе успешно реализован предложенный многостадийный синтез наноструктурированного BaTiO_3 , модифицированного оловом, и показана его фоточувствительность, что открывает перспективы для дальнейших исследований и разработки дозиметров излучения на его основе.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2023-2025 гг. соглашение FSMR-2023-0003.

Литература

- [1] Konstantinova, Elizaveta, et al. «Asymmetry of Structural and Electrophysical Properties of Symmetrical Titania Nanotubes as a Result of Modification with Barium Titanate». *Symmetry* 15, 12, 2141 (2023).
- [2] Diehl, Leo, et al. "C: Supporting Information for Competing factors in the directed design of photocatalysts: The case of SnTiO_3 ." *SnTiO_3 —a lone pair model system for studying structure-property relationships in photocatalysis, ferroelectricity and beyond*, 131 (2020).

Разработка матричного сенсора механических нагрузок для определения опасных состояний технических систем

Д.Д. Бутманов,* М.Ю. Прудникова, Т.П. Савчук

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1*

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

Необходимость контроля распределенных механических нагрузок для обеспечения безопасности технических систем стимулирует разработку новых сенсорных решений. Традиционные точечные датчики не всегда информативны, поэтому актуальной задачей является создание гибких матричных сенсоров [1]. Данная работа посвящена разработке и проверке технологии такого сенсора на основе электропроводящей ткани для регистрации распределения давления.

Был разработан матричный сенсор давления на тканной основе, способный контролировать как место, так и силу нажатия. Для проверки работоспособности сенсора были изготовлены и испытаны прототипы различной формы, например, квадратный образец 10x10 см (100 чувствительных точек). Тестирование показало равномерное распределение электрического сопротивления с максимальным отклонением по всем точкам менее 5.3%. Была продемонстрирована линейная зависимость отклика от приложенного давления ($R^2 > 0.96$), сопоставимая с коммерческими аналогами. Подтверждена возможность формования сенсора путем вырезания, что позволяет адаптировать его геометрию под конкретные задачи. Также была разработана концепция системы считывания данных, предусматривающая многоточечный опрос, различные интерфейсы и визуализацию карты нагрузок.

Для обработки и отправки полученных данных был использован модуль ESP32. Был реализован алгоритм опроса сенсора с использованием аналоговых мультимплексоров, а также возможность подключения датчика к сети Wi-Fi и отправка данных на клиентскую сторону. Для этого на микроконтроллере ESP32 реализован HTTP сервер, при обращении к которому происходит загрузка веб-интерфейса пользователя. После получения веб-интерфейса пользователь подключается к плате по каналу UDP и WebSocket. UDP-протокол используется для отправки текущих значений каждой измеряемой точки сенсора, WebSocket для получения информации о характеристиках подключенного сенсора и отправки команд на сенсор. Это позволило, имея малые вычислительные ресурсы платы ESP32, реализовать отправки каждые 50 миллисекунд.

Таким образом, работа демонстрирует успешное создание и апробацию технологии гибких матричных сенсоров механических нагрузок. Полученные прототипы обладают характеристиками, достаточными для их применения в системах распределенного мониторинга. Технология является перспективной для разработки средств диагностики, способных выявлять неравномерности нагрузок и определять потенциально опасные состояния технических систем и конструкций.

Литература

[1] Müller S., Seichter D., Gross H. M. Cross-talk compensation in low-cost resistive pressure matrix sensors IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), IEEE T. 1. С. 232-237 (2019).

Моделирование усиления ГКР-активного слоя тонкой плёнки системы Мо-Ag на поверхности СИПМ-пипетки

С.А. Кондратьева,^{1*} Д.В. Новиков,¹ Г.А. Меденков,¹ Л.С. Волкова,^{1,2} А.С. Ерофеев,³ В.С. Колмагоров,^{3,4} Ю.Н. Пархоменко³

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, 115487 Москва, Россия

³НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 3, ГСП-1

*e-mail: sonyk.220412@yandex.ru

Исследование внутриклеточных процессов представляет интерес для многих областей, в этой связи активно применяются сканирующая ион проводящая микроскопия (СИПМ). Используемые нанопипетки имеют диаметр выходного отверстия менее 100 нм. Сейчас перспективно совместное использование СИПМ метода со спектроскопией гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Модифицированная плазмонными металлами пипетка может быть использована для существующих методов как зонд, а посредством ГКР-спектров возможна регистрация веществ малой концентрации. Использование сплавов (например, Мо-Ag) для формирования ГКР-активных слоев позволяет увеличить срок хранения, так как частицы Ag преимущественно накапливаются внутри пленки и устойчивы к деградации. Формирование тонкой пленки возможно методом ионно-плазменного распыления мишени сплава. В таком методе формирование массива плазмонных наночастиц Ag осуществляется последующей термообработкой. Изменяя параметры формирования тонких пленок можно в широком диапазоне изменять характеристики массива: плотность, размеры и форму частиц. Проведение теоретического моделирования помогает подобрать оптимальные параметры массива плазмонных наночастиц для получения структуры с наибольшим коэффициентом усиления на определенной длине волны.

В данной работе было произведено моделирование влияния морфологии массива наночастиц Ag и длины волны возбуждения на коэффициент усиления. В расчете учитывался размер, форма и плотность наночастиц Ag для возбуждающего излучения с длинами волн 532 нм и 633 нм. Теоретические расчеты коэффициента усиления производились по формуле Лапласа и методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics с использованием модуля поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния света (волновая оптика) в частотной области. В результате расчетов установлено, что теоретический коэффициент усиления пипетки с плазмонными наночастицами Ag на длине волны 532 нм составил порядка 10^9 .

Моделирование усиления ГКР-активных слоев СИПМ-пипеток было произведено в рамках гранта Российского научного фонда № 22-19-00824. Моделирование выполнено на базе научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Изготовление самоупорядоченного массива плазмонных наностержней на основе матрицы анодного оксида алюминия

М.Ю. Прудникова,* Т.П. Савчук, И.Ю. Белоконева, Э.И. Струкова, Д.В. Новиков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

**e-mail: prudnikovamaria81@gmail.com*

Датчики для гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) являются простым и быстродействующим средством, позволяющим проводить как качественный, так и количественный анализ результатов, даже при их минимальных концентрациях. Эти устройства обеспечивают чувствительность и эффективность при обнаружении молекулярного состава веществ, что делает их незаменимыми в исследованиях микроскопических проб. В основе данной системы, как правило, лежит структура, состоящая из нанообъектов с нулевой или единственной размерностью, а также их сочетанием [1]. Ширина геометрической характеристики таких массивов играет решающую роль в обеспечении стабильности и достоверности результатов измерений. Неравномерность параметров может привести к увеличению сигнала, уменьшению точности анализа и ухудшению воспроизводимости данных, что особенно критично при работе с высокочувствительными методами детектирования. Существует множество способов создания подложек для гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР), однако литографические методы позволяют достичь наиболее низких параметров наноструктур. Несмотря на это, такие технологии связаны с существовавшими временными и экономическими издержками. Альтернативным решением может служить использование анодного оксида, который формирует самоорганизующийся массив с эффектом разброса их размеров и межпоровых расстояний. Этот подход не только снижает затраты, но и обеспечивает высокую воспроизводимость характеристик, что делает его перспективным для применения в ГКР-сенсорах.

В рамках данного исследования были созданы и изучены подложки для гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР), основанные на наностержнях серебра. Для их формирования использовался метод вакуумно-термического испарения с применением анодного оксида алюминия, который служил матрицей с вертикально ориентированными порами. Были проанализированы особенности морфологии излучаемых массивов наностержней, а также оценена их ГКР-активность. Особое внимание уделялось влиянию геометрических характеристик анодного оксида, таких как диаметр и расстояние между порами, на структуру наностержней и их способность усиливать комбинационное рассеяние. Результаты исследования показывают, что аналитические параметры контроля матрицы позволяют оптимизировать свойства ГКР-подложек для повышения их аналитической эффективности.

Работа выполнена в НИУ МИЭТ в рамках программы государственной поддержки университетов «Приоритет-2030».

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

Литература

[1] Han J. H. et al. High-sensitivity Troponin I assay for differential diagnosis of new-onset myocardial infarction in patients with acute decompensated heart failure //Yonsei Medical Journal. – 2021. – Т. 62. – №. 2. – С. 129.

ISBN 978-5-6053681-2-0

