

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

имени Ю. А. Осипьяна

Российский научный фонд (РНФ)

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

СБОРНИК ТЕЗИСОВ



*2-3 июня 2026 года
г. Черноголовка, Московская обл.*

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

2-3 июня 2026 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 978-5-6053681-4-4



ISBN 978-5-6053681-4-4

ОГЛАВЛЕНИЕ.

СЕКЦИЯ 1. ПЛАЗМОНЫ И МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ.

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Новые физические эффекты в металло-диэлектрических плазменных кристаллах.....	9
А.В. Никонов, А.А. Заболотных. Экранированный двумерный плазмон в системе с боковым контактом.....	10
В.А. Волков. Резонансы Фано на геликонах	11
И.В. Андреев, И.С. Шинко, А.С. Казаков, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Визуализация двумерных плазмонов при помощи пространственно-разрешенной методики оптического детектирования микроволнового поглощения	12

СЕКЦИЯ 2. ПЛАЗМОНЫ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ.

С. А. Андреева, А. А. Гаврилов, К. Р. Джикирба, А. В. Щепетильников, В. В. Соловьев, И. В. Кукушкин. Акустический плазмон в сверхпроводнике: первое наблюдение, теоретическое описание и размерный эффект	13
О.В. Орлов, А.В. Щепетильников, С.А. Андреева, Г.А. Николаев, И.В. Кукушкин. Наблюдение низкочастотных плазмонов в пленках сверхпроводника в геометрии полосы при помощи копланарной методики	14
П.А. Гусихин, И.В. Андреев, А.С. Казаков, И.С. Шинко, И.В. Кукушкин, В.М. Муравьев. Переход между экранированным и неэкранированным плазмоном в двумерной электронной системе, управляемый Максвелловской релаксацией	15
Г. А. Николаев, А.В. Щепетильников, В. В. Соловьёв, М. В. Шибалов, А. М. Мумляков, И. В. Трофимов, М. А. Тархов, И.В. Кукушкин. Бесконтактное измерение сверхпроводящей плотности в тонкой пленке нитрида ниобия	16

СЕКЦИЯ 3. ФИЗИКА 2D-ЭЛЕКТРОНОВ.

Кулик Л.В. Возбуждения зарядовой и спиновой плотности в лафлиновской жидкости	17
И.В. Загороднев, А.А. Заболотных, А.А. Матвеев, Д.А. Родионов, О.Ю. Архипова, Д.В. Калябин, А.Р. Сафин, С.А. Никитов. Магنون-циклотронный и магنون-плазменный резонансы 2D электронного газа на ферромагнитной пленке	18
Г. А. Николаев, А. В. Щепетильников, М. Э. Сергеев, С.А. Андреева, О.В. Орлов, И.В. Кукушкин. Спиновая поляризация двумерной жидкости	19

С.И. Дорожкин, А.А. Капустин. Комбинированные состояния дробного квантового эффекта Холла в двухслойных электронных системах	20
--	----

СЕКЦИЯ 4. НОВЫЕ СИСТЕМЫ.

А.В. Черненко, А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, Д.С. Нураев, В.Е. Бисти. Трионы, ферми-поляроны и связанные экситоны в ДППМ	21
В.В. Еналдиев, З.З. Алисултанов. Резонансное поглощение и фотоэлектрический эффект твистронных сегнетоелектрических гетероструктурах	22
Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, В.Е. Бисти, А.В. Черненко. Экситоны в муаровом потенциале гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$	23
А.А. Деменев, Н.С. Салахова, М.К. Никонов, О.А. Клименко, С.С. Косолобов, В.Н. Антонов, В.Д. Кулаковский, Н.А. Гиппиус и С.А. Дьяков. Широкополосное полностью диэлектрическое зеркало, сохраняющее хиральность света	24

СЕКЦИЯ 5. ФИЗИКА 2D-ЭЛЕКТРОНОВ.

А.В. Горбунов, Л.В. Кулик. Магнитоэкситонный конденсат: расширенная фазовая диаграмма	25
Кореев А. С., Ваньков А. Б., Бережной П. С. Прямая оптическая визуализация спиновой структуры двумерной электронной системы при $\nu = 1$	26
Дисперсия и эволюция запрещенных зон в трехмерных слоистых плазмонных кристаллах	27
Соколова М.С., Макаровская С.М., Бескинская А.А., Кукушкин И.В., Муравьев В.М. К.Р. Джикирба, И.В. Кукушкин, В.М. Муравьев. Плазменный отклик слоистой системы из двумерных электронных слоёв	28

СЕКЦИЯ 6. ТЕХНИКА И НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.

Д.В. Новиков, Л.С. Волкова, С.В. Дубков, С.А. Гаврилов, Д.Г. Громов. Эффект интерфейса в тонких пленках бинарных сплавов и его применение	29
А. А. Титенко, В. Д. Бобова, М. С. Соколова, С. М. Макаровская, В. В. Соловьев, В. В. Старцев, И. В. Кукушкин, В. М. Муравьев. Матричный амплитудный модулятор терагерцового излучения на основе перестраиваемой метаповерхности	30
А.В. Ларионов, Л.В. Кулик. Волноводно-плазмонные моды для газоанализа	31

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ.

И.В. Загороднев, Д.А. Родионов. Плазмоны в латерально ограниченных анизотропных и сильно экранированных двумерных электронных системах	32
Д.А. Родионов, И.В. Загороднев. Эффект увлечения в двумерной проводящей полосе при магнитоплазменных частотах	33
П.С. Бережной, А.С. Кореев, А.Б. Ваньков. Оптическое исследование спинового упорядочения в двумерной электронной системе MgZnO/ZnO в окрестности фактора заполнения $\nu = 2$	34
А.А. Капустин, С.И. Дорожкин. Влияние параллельной компоненты магнитного поля на туннелирование между слоями двухслойной электронной системы в широкой квантовой яме GaAs	35
В.М. Муравьев, И.В. Андреев, И.С. Шинко, А.А. Заболотных, А.С. Казаков, И.В. Кукушкин. Соотношение ширины линий плазменного и циклотронного резонансов	36
М.К. Никонов, С.А. Дьяков, Н.С. Салахова, А.А. Деменев, О.А. Клименко, С.С. Косолобов, В.Н. Антонов, В.Д. Кулаковский и Н.А. Гиппиус. Поляризационные свойства отражения от диэлектрического зеркала, сохраняющего хиральность света	37
И.С. Шинко, А.С. Казаков, И.В. Андреев, В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин. Пространственная визуализация плазменных колебаний в двумерной электронной системе в форме диска	38
С.С. Пуховикова, Е.С. Тихонов. Радиочастотное измерение квантового точечного контакта.....	39
В.Е. Бисти, Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, А.В. Черненко. Энергии связи и потенциальные энергии межслоевых и внутрислоевых экситонов в муаровой сверхрешетке гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$	40
А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, В.Е. Бисти. Краевой экситон на границе монослоя MoSe_2 и бислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$	41
Д.С. Нураев, Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, А.В. Черненко. Нейтральные и заряженные экситоны в монослоях WSe_2 с управляемой плотностью зарядов	42
А.А. Титенко, В.М. Муравьев. Управление спектральным откликом терагерцового ПИН-модулятора за счет нарушения симметрии метаповерхности	43
Г.А. Николаев, А.В. Щепетильников, М. Э. Сергеев, С.А. Андреева, О.В. Орлов, И.В. Кукушкин. О спиновом резонансе двумерной электронной системы вне состояния квантового эффекта Холла	44
Г.А. Николаев, А.В. Щепетильников, М. Э. Сергеев, С.А. Андреева, О.В. Орлов,	

И.В. Кукушкин. Изменение g-фактора постоянным током в двумерных электронных системах	45
Г.А. Николаев, А.В. Щепетильников, М. Э. Сергеев, С.А. Андреева, О.В. Орлов, И.В. Кукушкин. Новые спиновые моды ДЭС гетероперехода ZnO/MgZnO...	46
Г.А. Николаев, А.В. Щепетильников, В. В. Соловьёв, И.В. Кукушкин. Когерентный межслоевой транспорт близко лежащих тонких плёнок нитрида ниобия.....	47
И. В. Андреев, С.А. Андреева, И.В. Кукушкин. Простой способ определения концентрации сверхпроводящих электронов в плёнке	48
Д.А. Щигарев, А.В. Ларионов, Л.В. Кулик. Рамановская спектроскопия хиральных гравитонов и магниторотонов в лафлиновской жидкости	49
А.И. Дмитриев, Д.С. Гусев, Л.С. Паршина, М.С. Шанин, О.А. Новодворский, А.П. Шкуринов. Обменное смещение в гетероструктурах Fe/NiO/Pt.....	50
А.И. Дмитриев, О.Г. Рыбченко, В.Д. Седых. Зависимость температуры Нееля от концентрации кальция в $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\delta}$	51
В. Д. Седых, А.А. Топоркова, О.Г. Рыбченко, В.С. Русаков, А.И. Иванов, В.И. Кулаков. Обратимость структурных переходов в ортоферрите $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ при термообработке	52
А.С. Калашникова, Д. В. Сыч. Влияние неидеальности квантового неразрушающего измерения на безопасность протокола BB84 с состояниями ловушками при учете временного побочного канала.....	53
С.В.Зайцев, О.Г. Рыбченко, К.П. Мелетов. Кинетика фазового перехода $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ в кубическую структуру	54
С.В.Зайцев, Т.Н. Фурсова, О.Г. Рыбченко, В.Д. Седых. Колебательные моды в фазах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\gamma}$ с двумя кислородными окружениями ионов Fe_{3+}	55
С.В. Зайцев. Поляризация горячей люминесценции в ферромагнитных диодных структурах InGaAs/GaAs/ δ -Mn	56
С.В. Зайцев, А.П. Киселев, В.В. Кедров. Кинетика стимулированной люминесценции в нанокристаллических образцах NaGdF ₄ :Eu	57
И.А. Матвеева. Аугментация рамановских спектров как способ балансировки данных при идентификации образцов сыворотки крови	58
М.Э. Парфёнов, Д.Н. Артемьев, Д.В. Корнилин. Оценка количества регистрируемых на SiPM-детекторе фотонов в системах безопасности на основе рамановской спектроскопии	59
Д.С. Якименко, М.Э. Парфенов. Сравнение алгоритмов машинного обучения для классификации рамановских спектров химических соединений в системах безопасности	60
О.В. Орлов, А.В. Щепетильников, С.А. Андреева, Г.А. Николаев, И.В. Кукушкин. Особенности применения копланарного волновода для	

исследования сверхпроводящих плазмонов	61
О.В. Орлов, А.В. Щепетильников, С.А. Андреева, Г.А. Николаев, И.В. Кукушкин. Наблюдение низкочастотных плазмонов в пленках NbN в геометрии диска при помощи копланарной методики	62
А.А. Гаврилов, К.Р. Джикирба, А.С. Астраханцева, С. А. Андреева, В.В. Соловьев, И. В. Кукушкин. Исследование взаимодействия плазмонов в двумерном массиве дисков	63
К.Р. Джикирба, А.А. Гаврилов, С.А. Андреева, А.С. Астраханцева, В.В. Соловьев, И. В. Кукушкин. Широкополосная четвертьволновая пластинка в терагерцовом частотном диапазоне на основе кремниевых сеток	64
М.Ю. Прудникова, Д.Д. Бутманов, Д.В. Белякова, Т.П. Савчук. Управление фотоактивностью массивов нанотрубок анодного оксида титана	65
Д.Д. Шитова, Д.А. Дронова, П.П. Щербаков, Д.Д. Бутманов, Ю.В. Назаркина. Оптимизация методики синтеза пористого анодного оксида алюминия как матрицы для оптического детектирования химических веществ.....	66
В.А. Мелехов, К.Д. Чернявский, А.А. Горюшкин, Д.Н. Артемьев. Изучение рабочих режимов VBG-лазерных диодов для оценки спектральных смещений и артефактов, обусловленных температурой и мощностью излучения	67
Д.Д. Бутманов, Д.А. Дронова, Т.П. Савчук, А.А. Дронов, Д.Б. Белякова, М.Ю. Прудникова. Разработка газового сенсора на основе многослойных массивов нанотрубок диоксида титана, модифицированных наночастицами серебра ..	68
Д.В. Белякова, Т.П. Савчук, Д.Д. Бутманов, М.Ю. Прудникова. Чёрные покрытия на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана	69
А.И. Новосельцев, М.Д. Кружалина, Д.В. Новиков, Е.А. Лебедев, С.В. Дубков. Исследование влияния слоя ГКР-активного материала на процесс горения многослойных термитных структур Al/CuO для экспресс-формирования массивов плазмонных наночастиц	70
М.Д. Кружалина, А.И. Новосельцев, Л.С. Волкова, Е.А. Лебедев, С.В. Дубков, Д.Г. Громов. Моделирование усиления локализованного электрического поля ГКР-структуры Al/CuO/Ag, полученной в результате экзотермической окислительно-восстановительной реакции	71
Д.В. Новиков, Л.С. Волкова, А.О. Козлов, Д.Г. Громов, Т.С. Гришин, А.Г. Байгузина. Исследование влияния органических растворителей на электродинамические свойства ГКР-сенсора на основе наночастиц Ag	72
Ю.В. Чумаченко, Д.В. Новиков, Д.А. Велькер, К.С. Гетманская, С.В. Дубков. Разработка методики определения карбамида в кормовых смесях методом ГКР-спектроскопии.....	73
Т. Михайлин, С.А. Кондратьева, А.И. Новосельцев, Н.А. Негматова, А.Г. Байгузина, А.М. Тарасов. Моделирование плазмонных свойств массива наночастиц Ag на тонкой плёнке MoO ₃ : влияние геометрических параметров и	

угла падения излучения	74
С.А. Кондратьева, А.М. Тарасов, Д.В. Новиков, Н.А. Негматова, Л.С. Волкова, С.В. Дубков, С.А. Гаврилов, Д.Г. Громов. Формирование массива наночастиц Ag из тонкой пленки Mo-Ag методом ионно-плазменного распыления для применения в ГКР-спектроскопии	75
П.П. Щербаков, Е.Б. Клыкова, Ю.В. Назаркина. Формирование наностержней оксидов металлов путём анодного окисления многослойных структур Si/Ti/Al и Si/Ti/W/Al	76
О.А. Амбарцумян, П.И. Елисеев. Использование эндогенных порфиринов для детекции микобактерий туберкулеза.....	77

Новые физические эффекты в металло-диэлектрических плазменных кристаллах

В.М. Муравьев, И.В. Кукушкин

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

Фотонные кристаллы представляют собой искусственно сформированные среды с периодической модуляцией показателя преломления, характерный масштаб которой сравним с длиной волны электромагнитного излучения. В таких структурах формируются фотонные запрещённые зоны — диапазоны частот, в которых распространение электромагнитных волн подавлено вследствие интерференционных эффектов и брэгговского рассеяния. Данная концепция была впервые предложена Эли Яблонович в 1987 году [1]. Научные исследования в этой области открыли возможности для создания множества новых фотонных устройств (световоды, DFB лазеры).

Наряду с диэлектрическими фотонными кристаллами интенсивно развиваются металлические и металло-диэлектрические фотонные структуры. В таких системах ключевую роль играет сильное взаимодействие электромагнитного излучения со свободными электронами в металле. Это взаимодействие обеспечивает усиление брэгговского отражения, более эффективное подавление прохождения в запрещённых зонах, а также расширяет возможности активного управления дисперсионными свойствами фотонного кристалла за счёт интеграции активных элементов.

В настоящей работе показано, что стопка из диэлектрических подложек с нанесённой на каждую из них металлической сеткой может быть описана в приближении эффективной среды как однородная плазма при условии, что её характерные размеры существенно меньше длины волны излучения. В этом случае электромагнитный отклик структуры определяется наличием эффективной плазменной частоты, задающей границу между режимами прозрачности и отражения [2]:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c^2}{\varepsilon p d \ln(p/w)}$$

где ε — диэлектрическая проницаемость подложек, p — период металлической сетки, w — ширина проводящих элементов, а d — толщина диэлектрического слоя. Благодаря пространственной периодичности структуры её спектральные свойства характеризуются наличием чередующихся разрешённых и запрещённых зон, что позволяет рассматривать такие системы как **плазменные кристаллы**. В настоящей работе для определения зонной структуры плазменных кристаллов был предложен метод спектроскопии резонансов Фабри–Перо. Экспериментально показано [3], что N -я запрещённая зона начинается на частоте:

$$\omega_{sb} = N \omega_0 = N \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\pi}{d}, \quad N = 0, 1, 2, \dots$$

Показано, что нормированная ширина запрещённой зоны $\Delta\omega/\omega_0$ определяется единственным безразмерным параметром ω_p/ω_0 .

Литература.

- [1] Eli Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
- [2] V. M. Muravev, K. R. Dzhikirba, M. S. Sokolova, A. S. Astrakhantseva, and I. V. Kukushkin Superdispersive Plasmonic Metamaterial, Phys. Rev. Appl. 21, 034041 (2024).
- [3] M. S. Sokolova et al. Stop-Band Engineering in the Plasmonic Crystals, Phys. Rev. Appl (2026).

Экранированный двумерный плазмон в системе с боковым контактом

А.В. Никонов^{1,2*} А.А. Заболотных^{1,2}¹*ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, д.11 корп.7*²*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, д.20*^{*}*e-mail: a.nikonov@hse.ru*

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

Цель работы состояла в определении зависимости частоты плазменных колебаний от прикладываемого внешнего магнитного поля — магнитодисперсии. Для её поиска решались уравнения Максвелла для циркулярно поляризованных компонент напряжённости электрических полей. Уравнения решались в приближении «локальной ёмкости»: считалось, что расстояние между 2D системой и затвором d мало по сравнению с длиной волны плазмона $d \ll \lambda_p$. Полученные дифференциальные уравнения записывались через скалярную функцию и решались отдельно внутри и вне диска. Для нахождения дисперсии полученные решения сшивались по непрерывности нормальной компоненты тока.

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, но выше «перенормированной» за счёт эффектов электромагнитного запаздывания циклотронной частоты [1, 2]. Более того, полученные моды качественно соответствуют наблюдаемым экспериментально магнитоплазмонным резонансам. С другой стороны, полученная магнитодисперсия в малых магнитных полях слабо зависит от диэлектрического окружения, что свидетельствует о поляритонном происхождении изучаемой моды.

Работа выполнена за счёт средств гранта РФФ 25-22-00731.

Литература

- [1] 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).
- [2] A. A. Zabolotnykh and V. A. Volkov, Electrically controllable cyclotron resonance, Physical Review B 103, 125301 (2021).

Резонансы Фано на геликонах

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*

В последнее время началось интенсивное экспериментальное изучение поперечных электромагнитных волн в двумерных (2D) электронных системах. Полученные результаты нуждаются в теоретическом осмыслении.

Работа посвящена аналитическому теоретическому исследованию 2D геликонов – циркулярно поляризованных электромагнитных волн в электронной плазме 2D электронных систем в нормальном магнитном поле. Принципиально важным является учет конечности толщины диэлектрической подложки и радиационного характера упомянутых волн. Для образцов, бесконечных в латеральных направлениях (вдоль осей OX и OY), 2D геликоны образуют семейство квазистоячих волн, медленно распадающихся в вакуум вдоль оси OZ . Конечность толщины диэлектрической подложки приводит к квантованию нормальной компоненты волнового вектора и вещественной части частоты геликона. Прояснены особенности проявления в спектре и отклике геликонов резонансов Фано, которые типичны в данной системе.

Существенно используется аналогия между квантовой механикой электронов (в том числе, ее неэрмитовой версией, и волновой механикой геликонов. Это позволяет не только упростить вычисления, но качественно интерпретировать результаты. Последние сравниваются с экспериментом.

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

Литература.

- [1] A.K. Sarychev and V.M. Shalaev, *Electrodynamics of Metamaterials*, World Scientific Publishing, Singapore (2007).
- [2] В.И. Кукушкин, А.Б. Ваньков, И.В. Кукушкин, *Письма в ЖЭТФ* 98, 72 (2013).

**Визуализация двумерных плазмонов при помощи
пространственно-разрешенной методики
оптического детектирования микроволнового поглощения**

И.В. Андреев,¹ И.С. Шинко,^{1,2} А.С. Казаков,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: andreev@issp.ac.ru

На сегодня известно лишь несколько работ, посвящённых прямой пространственно-разрешенной визуализации плазменных волн в двумерных электронных системах (ДЭС) [1-4] в полупроводниковых наноструктурах и атомно-тонких слоистых материалах. В работах [1-3] применена методика сканирующей ближнепольной оптической микроскопии, технически довольно сложная и инвазивная в том смысле, что зонд возмущает электрическое поле плазменной волны. В работе [4] использовалась методика оптического детектирования с одномерным пространственным разрешением, которая, к сожалению, не получила достаточного развития.

В данной работе предлагается методика двухкоординатной пространственной визуализации двумерных плазмонов в высокоподвижной ДЭС в квантовой яме GaAs/AlGaAs на основе оптического детектирования микроволнового поглощения с пространственным разрешением. Методика базируется на высокой чувствительности формы линии рекомбинантной фотолуминесценции двумерных электронов в прямозонном полупроводнике GaAs к разогреву. Образец с ДЭС макроскопических (0.5–10 мм) размеров исследуется при $T = 10\text{--}20\text{ K}$ на криогенной зондовой станции, оснащённой СВЧ и оптическими зондами. СВЧ зонды обеспечивают подвод сигнала в диапазоне до 44 ГГц к копланарным портам на образце. Этот сигнал используется для возбуждения плазмонов в ДЭС посредством копланарных линий или одиночных затворов. Параллельно оптический зонд со 100- или 50-мкм световодом позволяет проводить локальную спектроскопию фотолуминесценции двумерных электронов в различных точках образца. Здесь размер пятна сбора оптического сигнала задаётся диаметром используемого световода и определяет пространственное разрешение методики. Механическое пространственное сканирование вдоль поверхности образца даёт возможность строить двумерную карту разогрева, визуализирующую узлы и пучности плазменной волны в ДЭС. Одновременно с помощью СВЧ зондов можно проводить измерения S-параметров образца векторным анализатором цепей.

В докладе будут продемонстрированы примеры использования данной методики на простых геометриях (например, успешная визуализация собственных мод различной симметрии в диске ДЭС диаметром 0.7 мм), обсуждаются вопросы улучшения пространственного разрешения методики и её потенциального применения к различным задачам, включая задачи плазмонной волновой оптики.

Литература

- [1] A. Y. Nikitin et al., Nature Photonics 10, 239 (2016).
- [2] J. Chen et al., Nature 487, 77 (2012).
- [3] X. Yang et al., Advanced materials 28, 2931 (2016).
- [4] I. Baskin et al., Phys. Rev. B 84, 041305 (2011).

Акустический плазмон в сверхпроводнике: первое наблюдение, теоретическое описание и размерный эффект

С. А. Андреева,^{1,2*} А. А. Гаврилов,² К. Р. Джикирба,² А. В. Щепелильников,²
В. В. Соловьев,² И. В. Кукушкин²

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

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

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

Коллективные возбуждения в сверхпроводниках, в частности плазмоны, остаются малоизученными, несмотря на их потенциальную роль в динамике кубитов и терагерцовой электронике. Основная трудность их наблюдения — высокая плазменная частота, превышающая сверхпроводящую щель из-за большой концентрации электронов. В данной работе мы преодолели это ограничение, используя тонкие грязные плёнки NbN, выращенные методом атомно-слоевого осаждения на подложках из высокорезистивного кремния и сапфира. Плотность сверхпроводящих электронов в таких плёнках составила $n_s \approx 1.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и оказалась на три порядка меньше полной электронной плотности, что позволило понизить плазменную частоту ниже величины сверхпроводящей щели.

В спектрах терагерцового пропускания решетки сверхпроводящих дисков диаметром 0.3 мм с периодом 1 мм при температуре 4 К наблюдается серия эквидистантных минимумов. При повышении температуры эти особенности сдвигаются в область более низких частот, уширяются и исчезают при переходе через критическую температуру. Дисперсия обнаруженных мод оказалась линейной $\omega = sk$, со скоростью $s \sim 1.2 \times 10^7 \text{ м/с}$ для образца на кремниевой подложке, что на порядок превышает фермиевскую скорость нормальных электронов. Температурная зависимость и характерная скорость позволяет отличить обнаруженное возбуждение от моды Карлсона-Голдмана [1]. Установлено, что скорость наблюдаемого плазмона имеет корневую зависимость от произведения сверхпроводящей концентрации электронов и толщины сверхпроводящего слоя.

Таким образом, впервые экспериментально обнаружен двумерный акустический плазмон в сверхпроводящих плёнках NbN с линейным законом дисперсии [2]. Эти результаты заполняют важный пробел в фундаментальной физике коллективных возбуждений в сверхпроводниках и открывают перспективы для создания терагерцовых устройств и сверхпроводящих квантовых схем, где плазменные эффекты ранее не учитывались.

Литература

- [1] R. V. Carlson and A. M. Goldman, Phys. Rev. Lett. 34, 11 (1975).
- [2] S. A. Andreeva, K.R. Dzhekirba, M.V. Shibalov et al., Phys. Rev. B (2026).

Наблюдение низкочастотных плазмонов в пленках сверхпроводника в геометрии полосы при помощи копланарной методики

О.В. Орлов,^{1,2*} А.В. Щепетильников,² С.А. Андреева,^{2,3} Г.А. Николаев,^{1,2} И.В. Кукушкин³

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

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 2

*e-mail: orlov.ov@phystech.edu

Взаимодействие сверхпроводников с электромагнитным полем многогранно. При увеличении частоты, мы выходим за границы применения Лондоновских уравнений и возникает множество коллективных мод. Примером могут служить двумерные акустические плазменные возбуждения [1], акустическая мода Карлсона-Голдмана [2], амплитудная мода Шмида-Хиггса [3]. В данной работе исследуются плазменные моды, наблюдение которых обычно затруднено в связи с высокой плазменной частотой. Одним из способов её понижения является использование тонких пленок грязного сверхпроводника, в которых сверхпроводящие электроны составляют малую долю от общего числа.

В качестве объекта исследований выступали пленки NbN толщиной 8 нм, выращенные на диэлектрической подложке ниобата лития. Критическая температура пленки составляла 12.6 К. Из сверхпроводящей пленки были литографически изготовлены полосы различных длин и ширины. Измерения проводились в условиях паров гелия-4 в широком диапазоне температур от 4.2 К до T_c исследуемого образца. Для возбуждения и детектирования плазмонов использовался копланарный волновод, через который пропусклось излучение субтерагерцового диапазона, по затуханию которого и осуществлялось детектирование. Измерения проводились в области от 10 МГц до 44 ГГц при помощи векторного анализатора цепей. Для эффективного возбуждения плоскость волновода была совмещена с плоскостью полос.

В результате исследования были обнаружены плазменные возбуждения, проявляющиеся как минимумы пропускания волновода и обладающие линейной дисперсией и скоростью, сильно зависящей от температуры, вплоть до критической. Также была исследована их зависимость от геометрических параметров полосок, позволяющая уточнить характер плазменных возбуждений. Характеристики наблюдаемого плазмона сравнивались с недавно обнаруженными в более высоком частотном диапазоне акустическими модами двумерных плазменных колебаний [1].

Литература

- [1] S. A. Andreeva, K. R. Dzhikirba, M. V. Shibalov, A. M. Mumlyakov, I. V. Trofimov, A. V. Shchepetilnikov, O. V. Orlov, V. V. Solovyev, V. M. Kovalev, A. V. Chaplik, M. A. Tarkhov, and I. V. Kukushkin Observation of plasma excitations of superconducting electrons in NbN thin films, *Physical Review B*, 113(10), L100503.
- [2] R. Carlson and A. Goldman, Propagating order-parameter collective modes in superconducting films, *Physical Review Letters* 34, 11 (1975).
- [3] J. Lorenzana and G. Seibold, Long-lived Higgs modes in strongly correlated condensates, *Phys. Rev. Lett.* 132, 026501 (2024).

Переход между экранированным и неэкранированным плазмоном в двумерной электронной системе, управляемый Максвелловской релаксацией

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

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

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

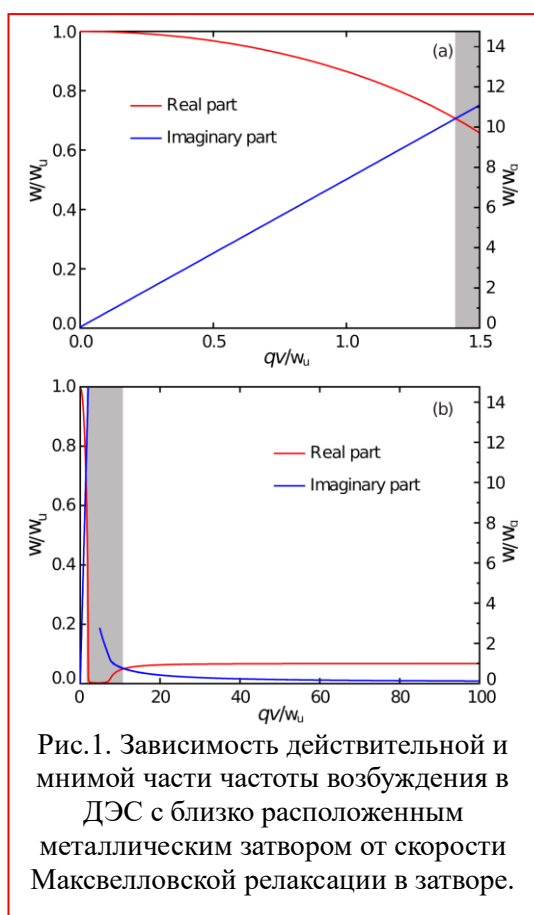


Рис.1. Зависимость действительной и мнимой части частоты возбуждения в ДЭС с близко расположенным металлическим затвором от скорости Максвелловской релаксации в затворе.

Известно, что Максвелловская релаксация флуктуаций плотности заряда в двумерном случае описывается как распространение возбуждения с характерной скоростью, связанной с двумерной проводимостью системы σ_s [1]:

$$v = \frac{\sigma_s}{2\varepsilon_0\varepsilon_{eff}}.$$

В данной работе показывается, что скорость Максвелловской релаксации в металлическом затворе является фактором, определяющим характер спектра плазменных возбуждений в близко расположенной двумерной электронной системе (ДЭС). В случае низкой проводимости затвора, а точнее, при условии $v \ll v_p$, где v_p – скорость плазмона в ДЭС, возбуждения имеют неэкранированный характер [2]:

$$\omega_u = \sqrt{\frac{ne^2}{2m^*\varepsilon_0\varepsilon_{eff}}} q,$$

где q – волновой вектор возбуждения. В обратном случае, $v \gg v_p$, возбуждения становятся экранированными [3]:

$$\omega_{scr} = \sqrt{\frac{ne^2h}{m^*\varepsilon_0\varepsilon_{eff}}} q, \quad qh \ll 1.$$

В общем случае, было показано, что частота плазменного возбуждения в ДЭС описывается простым уравнением:

$$v_p(\omega^2 + i\gamma\omega - \omega_u^2) + iv(\omega^2 + i\gamma\omega - \omega_{scr}^2) = 0.$$

Также, в данной работе было экспериментально проверено следствие из этого уравнения – линейная зависимость ширины плазменного резонанса от скорости Максвелловской релаксации: $\Delta\omega = 1/\tau + qv$.

Литература

- [1] М.И. Дьяконов, А.С. Фурман, ЖЭТФ 92, 1012 (1987).
- [2] F. Stern, Phys. Rev. Lett. 18, 546 (1967).
- [3] А.В. Чаплик, ЖЭТФ 62, 746-753 (1972).

Бесконтактное измерение сверхпроводящей плотности в тонкой пленке нитрида ниобия

Г.А. Николаев,^{1*} А.В. Щепетильников,¹ В.В. Соловьёв,¹

М.В. Шибалов,² А.М. Мумляков,² И.В. Трофимов,² М.А. Тархов,²

И.В. Кукушкин¹

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, 119334 Москва, Россия

*e-mail: nikolaevgk@gmail.com

В работе исследована температурная зависимость сверхпроводящей плотности в тонкой пленке нитрида ниобия толщиной 8 нм методом бесконтактного измерения взаимной индуктивности. Эксперимент основан на анализе сигнала двух соосных катушек, между которыми расположен образец [1]. Переменное магнитное поле частично экранируется

сверхпроводящей пленкой. Степень экранирования сигнала позволяет определить глубину проникновения и, соответственно, сверхпроводящую плотность. Из температурной зависимости взаимной индуктивности численно восстановлена глубина проникновения магнитного поля.

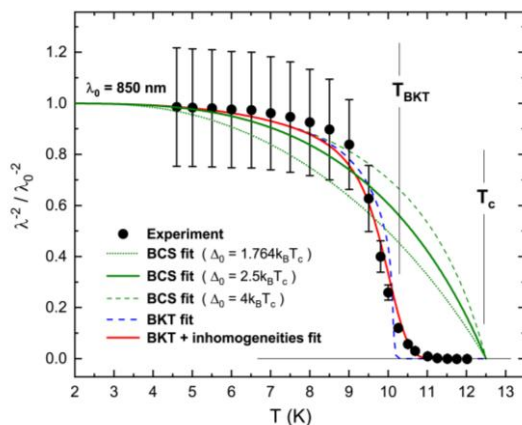


Рис.1. Температурная зависимость глубины проникновения λ .

Полученные результаты (Рис. 1) показывают, что теория БКШ хорошо описывает поведение системы при низких температурах только при введении эффективного параметра, связанного с неоднородностью пленки. Вблизи критической температуры наблюдается существенное отклонение от БКШ-поведения.

Показано, что наилучшее согласие с экспериментом достигается при учёте перехода Березинского–Костерлица–Таулеса, сглаженного неоднородностями пленки. Получена численная оценка сверхпроводящей плотности. Продemonстрировано, что предложенная методика чувствительна к неоднородностям и может использоваться для характеристики качества тонких сверхпроводящих пленок NbN.

Литература

[1] A.T. Fiory, A.F. Hebard, P. M. Mankiewich, R. E. Howard, Applied physics letters 52, 2165-2167 (1988).

Возбуждения зарядовой и спиновой плотности в лафлиновской жидкости

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

Будет представлено описание возбуждений в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов $1/3$, основанное на численных расчетах с использованием метода точной диагонализации для конечного числа электронов на плоскости в геометрии тора с прямоугольной магнитной решёткой Бравэ [1]. Для сравнения теории и эксперимента будет дан обзор последних экспериментальных работ, выполненных в ИФТТ РАН, связанных с исследованием стоксового неупругого рассеяния света на возбуждениях двумерной электронной системы в условиях формирования лафлиновской жидкости. При низких температурах (~ 100 мК) в спектрах неупругого рассеяния света обнаружены линии рассеяния света на возбуждениях зарядовой и спиновой плотности лафлиновской жидкости: хиральных гравитонах [2,3], ротонах, спин-хиральных гравитонах (спин-магнитогравитонах [4]) и спин-ротонах. С изменением угла наклона вектора индукции магнитного поля относительно нормали к двумерной системе (при фиксированной по величине нормальной компоненте вектора индукции магнитного поля) энергии хиральных гравитонов и ротонов не изменяются, а энергии спин-хиральных гравитонов и спин-ротонов изменяются на величину равную изменению зеемановской энергии от продольной (вдоль плоскости двумерной системы) компоненты индукции магнитного поля. Зеемановская энергия электронов измерялось в тех же экспериментальных условиях из энергии линии неупругого рассеяния света ларморовского спинового экситона (спин-флип экситона) в лафлиновской жидкости. Энергии наблюдаемых линий неупругого рассеяния света хорошо согласуются с численными расчетами. Измерена зависимость интенсивностей линий стоксового неупругого рассеяния света от температуры электронной системы. Обнаружено пороговое исчезновение линий неупругого рассеяния света в диапазоне электронных температур 350-400 мК. Пороговая температура оказывается существенно меньшей активационной щели, отделяющей электронные состояния диэлектрической лафлиновской жидкости от объемных проводящих состояний [5], и щели в плотности состояний лафлиновской жидкости, измеряемой в оптических и магнетоместных экспериментах [6,7]. Пороговое исчезновение линий неупругого рассеяния света связывается с новым низкотемпературным фазовым переходом в диэлектрической лафлиновской жидкости.

Литература

- [1] О. А. Григорьев, Л. И. Мусина, А. А. Загитова и др., Письма в ЖЭТФ 116, 364 (2022).
- [2] S.-F. Liou, F. D. M. Haldane, K. Yang et al, Phys. Rev. Lett. 123, 146801 (2019).
- [3] J. Liang, Z. Liu, Z. Yang et al, Nature 628, 78 (2024).
- [4] L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina et al, Nat. Commun. 12, 6477 (2021).
- [5] R. R. Du, H. L. Stormer, L. N. Pfeiffer et al, Phys. Rev. Lett. 70, 2944 (1993).
- [6] D. A. Shchigarev, A. V. Larionov, L. V. Kulik et al, Phys. Rev. B 112, 205425 (2025).
- [7] V. S. Khrapai, A. A. Shashkin, M. G. Trokina et al, Phys. Rev. Lett. 99, 086802 (2007).

Магнон-циклотронный и магнон-плазменный резонансы 2D электронного газа на ферромагнитной пленке

И.В. Загороднев, * А.А. Заболотных, А.А. Матвеев, Д.А. Родионов, О.Ю. Архипова, Д.В. Калябин, А.Р. Сафин, С.А. Никитов

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

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

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

Коллективные колебания плотности заряда (плазмоны) в двумерных (2D) электронных системах являются фундаментальными возбуждениями, определяющими динамический отклик системы на внешние электромагнитные воздействия, так же как и спиновые волны (магноны) в магнетиках. И плазмоны, и магноны рассматриваются в качестве активных элементов генераторов и детекторов микроволнового или терагерцового излучения. В последние несколько лет стала активна обсуждаться идея объединения (гибридизации) этих систем с формированием связанных состояний плазмон-магнонов [1-4]. В данной работе теоретически рассматриваются условия эффективной гибридизации и особенности дисперсии таких коллективных мод в двумерной электронной системе, расположенной на магнитной диэлектрической пленке.

Вначале будет рассмотрен микроволновый отклик на внешнее электромагнитное излучение, падающее по нормали на 2D электронную систему, расположенную на намагниченной до насыщения в перпендикулярном направлении диэлектрической ферромагнитной пленке, которая, в свою очередь, лежит на проводящем металле (затворе), при этом вся система помещена во внешнее постоянное магнитное поле [5]. Будет показано, что ферромагнитный резонанс пленки и циклотронный резонанс электронов 2D системы в магнитном поле взаимодействуют (через магнитное поле, создаваемое колебаниями заряда в 2D системе и прецессией намагниченности в пленке), что приводит к их расталкиванию («антикроссингу»). В области антикроссинга происходит не только модификация частот резонансов, по сравнению со случаем циклотронного резонанса в 2D системе без ферромагнитной подложки и ферромагнитного резонанса в пленке без 2D системы, но и существенное изменение ширины линий резонансов. Предполагается обобщить данные результаты на антиферромагнитные пленки.

Во второй части доклада будет обсуждаться гибридизация плазменного и магнонного резонансов в описанной выше системе.

Литература

- [1] C. Finnigan, M. Kargarian, D.K. Efimkin, arXiv:2601.18995 (2026).
- [2] H.Y. Yuan, Y.M. Blanter, H.Q. Lin, Phys. Rev. B 111, 024422 (2025).
- [3] А.М. Пикалов, А.В. Дорофеев, А.Б. Грановский, Письма в ЖЭТФ 113, 527 (2021).
- [4] Y.V. Bludov, J.N. Gomes et al., 2D Mater. 6, 045003 (2019).
- [5] А.А. Заболотных, И.В. Загороднев и др., Письма в ЖЭТФ 123, 293 (2026).

Спиновая поляризация двумерной жидкости

**Г. А. Николаев,^{1,2*} А. В. Щепетильников,¹ М. Э. Сергеев,^{1,2} С.А. Андреева,^{3,1}
О.В. Орлов,^{1,2} 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 работе исследуется спиновая поляризация в двумерной сильно коррелированной электронной системе гетероперехода ZnO/MgZnO. В параллельном магнитном поле орбитальное движение подавляется, и поле преимущественно взаимодействует только со спиновой подсистемой. Полная спиновая поляризация достигается при $B_c = 2\pi\hbar^2 n / \mu_B g^* m^*$. Динамика спиновой поляризации изучалась с помощью электронного спинового резонанса (ЭПР), детектируемого в сопротивлении. Амплитуда ЭПР возрастает с увеличением

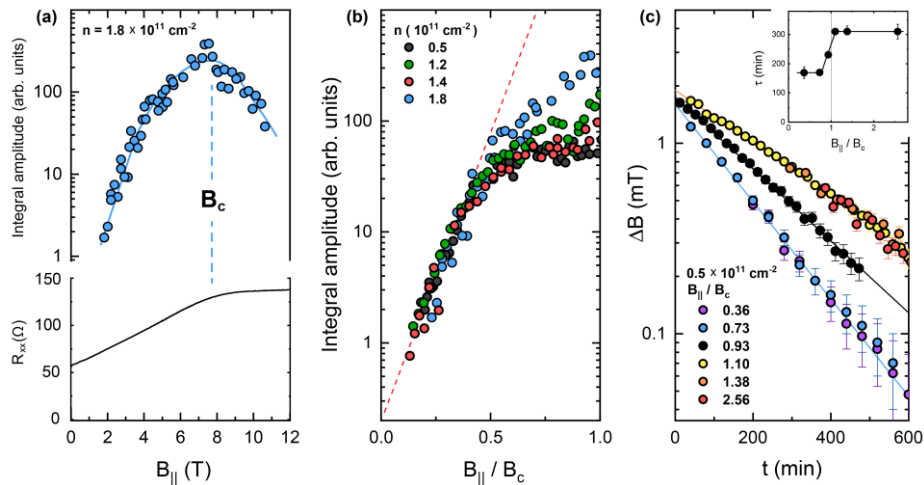


Рис.1. (а) Амплитуда ЭПР от магнитного поля. Черной сплошной обозначена кривая R_{xx} . (б)

Амплитуда ЭПР скалируется при $B_{||}/B_c < 0.5$ с параметром B_c (с) К определению ядерной

магнитного поля, достигает максимума в B_c , где на кривой магнитосопротивления наблюдается излом [1], и уменьшается при более высоких полях (Рис. 1 (а)). При $B_{||}/B_c < 0.5$ интегральная амплитуда ESR масштабируется для всех концентраций электронов с параметром B_c (Рис. 1 (б)), что указывает на определяющую роль отношения $B_{||}/B_c$ в спиновой поляризации. При B_c время релаксации ядерных спинов почти удваивается (вставка на Рис. 1 (с)), что свидетельствует о чувствительности ядерной спиновой подсистемы к изменениям ориентации электронных спинов.

Литература

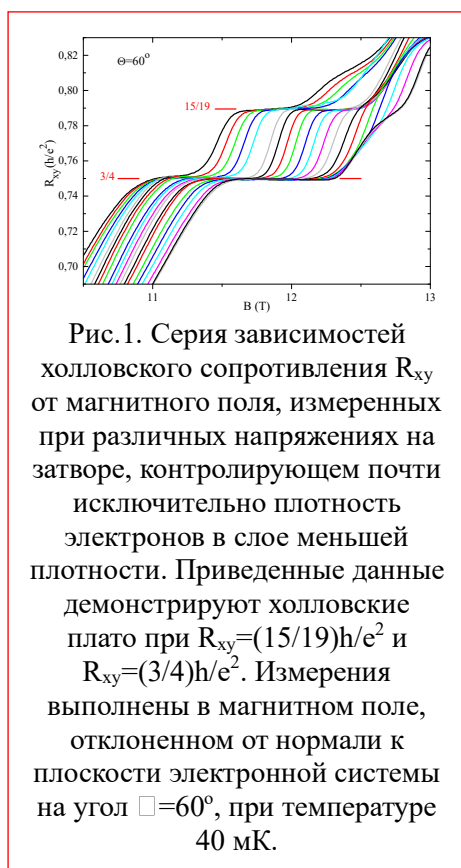
[1] J. Falson, I. Sodemann, B. Skinner, D. Tabrea, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, K. von Klitzing and J. H. Smet, Electrodynamics of Metamaterials, Nature Mat. **21**, 311-316 (2022).

Комбинированные состояния дробного квантового эффекта Холла в двухслойных электронных системах

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*



В широких (50 и 60 нм) квантовых ямах GaAs с двумя слоями электронов, расположенными около противоположных стенок ям, изучены различные состояния дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ), возникающие как комбинация различных несжимаемых состояний в слоях. Исследованы образцы полевых транзисторов с двумя затворами, расположенными с разных сторон квантовой ямы, что позволяет плавно изменять плотность электронов в разных слоях при помощи затворных напряжений. Эксперименты включали измерения магнетосопротивления, холловского сопротивления, а также низкочастотных импедансов между затворами и электронной системой в квантовой яме. Обнаружены состояния ДКЭХ, образованные как несжимаемыми состояниями с целочисленными факторами заполнения единица ($5/4=1+1/4$, $4/3=1+1/3$, $5/3=1+2/3$, $7/5=1+2/5$, $8/5=1+3/5$) и двойка ($7/3=2+1/3$, $8/3=2+2/3$) в слое большей плотности, так и с дробными факторами заполнения в обоих слоях. Состояния последнего типа наблюдались только в образцах с квантовой ямой 50 нм. Пример такого состояния, соответствующего фактору заполнения $19/15=2/3+3/5$ ($R_{xy}=(15/19)h/e^2$) приведен на рисунке. Исследования зависимости диссипативной проводимости от плотности

электронов в слое меньшей плотности подтвердили интерпретацию этого состояния, а также позволили установить, что плато с $R_{xy}=(3/4)h/e^2$ на рисунке, соответствует комбинированному состоянию с равными факторами заполнения в слоях, равными $2/3$. Несжимаемые состояния с целочисленными факторами заполнения в слое большей плотности проявляются в виде минимумов емкости между электронной системой и затвором, соседним с этим слоем, и имеют значительную ширину по магнитному полю, обусловленную перераспределением электронов между слоями. В результате состояния ДКЭХ реализуются в довольно широких диапазонах магнитных полей и затворных напряжений (см. рис.). Комбинированные состояния ДКЭХ при полных факторах заполнения, меньших двух, в исследованных образцах возникают только в наклонных магнитных полях, обеспечивающих существование двухслойного состояния за счет уменьшения туннельной связи между слоями. Для их наблюдения в образцах с разной шириной квантовых ям требуется различный угол наклона поля: около 60° (40°) для образцов с квантовой ямой 50 (60) нм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Трионы, ферми-поляроны и связанные экситоны в ДПМ

А.В. Черненко,* А.С. Бричкин, Г.М. Голышков, Д.С. Нураев, В.Е. Бисти*¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: chernen@issp.ac.ru*

Экситоны определяют оптические свойства гетероструктур с монослоями дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) вплоть до комнатных температур, так как их энергия связи достигает нескольких сотен мэВ. Присутствие свободных носителей заряда в монослое приводит появлению дополнительной линии в спектрах фотолюминесценции или отражения, приписываемой заряженным экситонам (Рис.1). так давно вместо нейтральных и заряженных экситонов стало общепринятым говорить о притягивающих и отталкивающих ферми-поляронах.

Ферми-поляроны в отличие от трионов являются бозонами и обладают характеристиками, позволяющими экспериментально отличить их друг от друга. Например, ферми-поляроны как и экситоны испытывают расщепление уровней энергии за счет электронно-дырочного обменного взаимодействия в системах с низкой симметрией. Предложение использовать деформацию для понижения симметрии системы и наблюдения такого расщепления, было высказано в работе [1]. Влияние подобной деформации на свойства ферми-поляронов было экспериментально исследовано в работе [2].

Альтернативой приписывания нижней по энергии линии отражения или ФЛ триону или ферми-полярону, является её ассоциирование с экситонами, локализованными на примесях и дефектах на границе монослоя или в барьерах, каковыми в этих структурах являются слои гексагонального нитрида бора (hBN). Такая интерпретация восходит к работам в нейтральных квантовых ямах GaAs/AlGaAs [3]. В структурах с монослоями ДПМ подобная интерпретация нижней по энергии линии ФЛ правдоподобна с учетом модифицированного потенциала взаимодействия экситонов с примесями. Численные оценки дают величину энергии связи порядка 20 мэВ для примеси, расположенной в ближайшем к монослою ДПМ слою hBN. Энергия связи экситонов с ионизованной примесью, расположенной на расстоянии двух слоев от монослоя ДПМ, существенно меньше ~ 3 мэВ и не приводит к связанному состоянию при достаточно низких температурах [4]. Однако окончательный выбор между двумя альтернативами требует дополнительных исследований.

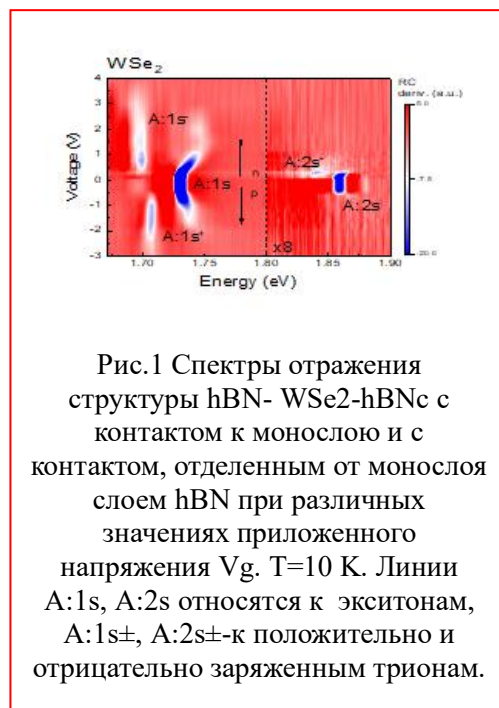


Рис.1 Спектры отражения структуры hBN- WSe₂-hBN с контактом к монослою и с контактом, отделенным от монослоя слоем hBN при различных значениях приложенного напряжения Vg. T=10 K. Линии A:1s, A:2s относятся к экситонам, A:1s $\pm$, A:2s $\pm$ -к положительно и отрицательно заряженным трионам.

К
Не

Литература

- [1] Z.A. Iakovlev and M.M. Glazov, J.Lumin., 273, id 120700(2024).
- [2] D. Yagodkin, K.Burfeindt, Z.A. Iakovlev et al., Nat Commun 16, 10232 (2025).
- [3] V.V. Solovyev and I.V. Kukushkin, Phys. Rev. B 79, 233306(2009).
- [4] В.Е. Бисти, Г. М. Голышков, А. С. Бричкин, А. В. Черненко, ФТП, 67, 1791(2025).

Резонансное поглощение и фотоэлектрический эффект твистронных сегнетоэлектрических гетероструктурах

В.В. Еналдиев, З.З. Алисултанов

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

*e-mail: enaldiev.vv@mipt.ru

Релаксация длиннопериодных сверхрешеток муара, возникающих на слабо разориентированном интерфейсе бислоев (или тонких пленок) гексагонального нитрида бора (hBN) или дихалькогенидов переходных металлов (MX_2 , $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$; $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$), сопровождается образованием периодического массива треугольных доменов, характеризующихся чередующейся (вниз-вверх) сегнетоэлектрической поляризацией перпендикулярной плоскости слоев [1]. Поэтому, в вертикальных ван дер ваальсовых гетероструктурах, скомпанованных из слабо разориентированных бислоев (hBN или MX_2) и дополнительного токопроводящего слоя (например, графена), в последнем возникает наведенный электростатический потенциал от релаксированной сверхрешетки муара (доменной структуры). Универсальность подобного потенциала делает твистронные ван-дер-ваальсовые гетероструктуры с

сегнетоэлектрическими доменами привлекательным для экспериментального исследования [2,3].

В докладе будет показано [4], что оптоэлектронные свойства носителей тока в графене модифицируются в

присутствии электростатического потенциала релаксированной сверхрешетки муара в гетероструктурах с

графеном на слабоориентированных бислоях hBN (или MX_2). Такое изменение происходит за счет перенормировки спектра безмассовых дираковских фермионов при образовании минизон в электростатическом потенциале муара (см. рис. 1а). Причем, нечетность потенциала сохраняет электрон-дырочную симметрию спектра минизон и порождает симметричные по энергии сингулярности Ван-Хова в плотности состояний. Последние приводят к резонансам в оптическом поглощении при межминизонных переходах на частотах, отвечающим разностям энергий между пиками плотности состояний (рис 1b), при этом положением резонансов можно задавать как периодом сверхрешетки, так и меняя заполнение минизон при помощи затвора [4].

Образование структуры минизон, связанных ненулевыми межзонными матричными элементами скорости, приводит к фотогальваническому эффекту, проявляющему в резонансных особенностях выпрямленного фототока [4].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №24-72-10015.

Литература

- [1] A. Weston et al., Nature Nanotechnology, **17**, 390 (2022).
- [2] J. Ding et al. Nature Comm., **15**, 9087 (2024).
- [3] X. Wang et al. Nature Comm., **16**, 187 (2025).
- [4] V.V. Enaldiev et al., arXiv:2602.06656 (2026).

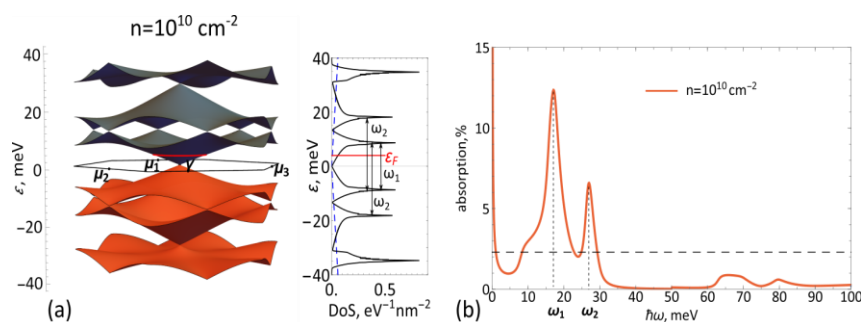


Рис. 1. (а) Спектр и плотность состояний низкоэнергетических минизон в графене, индуцируемая электростатической сверхрешеткой муара. (b) Зависимость коэффициента поглощения от частоты с резонансами, отвечающими разности энергий между основными пиками плотности состояний. Пунктирная прямая отвечает межзонному поглощению ($\approx 2.3\%$) изолированного графена.

Экситоны в муаровом потенциале гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ **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 монослоёв дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) представляют собой новый класс материалов, привлекающий внимание как перспективный объект для создания на их основе разнообразных оптоэлектронных устройств.

Особый интерес представляют гетеробислои ДПМ, в которых образуются муаровые сверхрешетки, период которых определяется углом рассогласования θ и разностью периодов решеток монослоев. Выделяют два типа гетероструктур: R-типу соответствуют углы, близкие к 0° , а H-типу соответствуют углы, близкие к 60° [1].

Методом механической эксфолиации и последовательного переноса были изготовлены структуры R- и H-типа с гетеробислоями $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ инкапсулированными гексагональным нитридом бора (hBN). Измерения микрофотолюминесценции и спектров микроотражения проводились в оптическом гелиевом криостате с системой термостабилизации в диапазоне температур 10-296 К.

Наибольший оптический отклик гетеробислоев $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) дают внутрислоевые экситоны монослоя MoSe_2 , причем данные линии оказываются расщепленными в обоих типах структур, как в случае нейтральных (DX_1 и DX_2), так и в случае заряженных (DT_1 и DT_2) экситонов (рис. 1). Кроме того в спектрах ФЛ наблюдаются более слабые линии межслоевых экситонов IX_1 и IX_2 . Возможность таких переходов возникает вследствие изменения правил отбора в разных точках пространства в муаровых сверхрешетках с большим периодом [1]. В отличие от структур H-типа, в структурах R-типа глубина муарового потенциала больше [2], и возможно наблюдение нескольких пиков межслоевых экситонов, соответствующих разным энергетическим уровням размерного квантования в минимуме энергии муаровой решетки. Повышение температуры приводит к высвобождению экситонов из муарового потенциала, что приводит к изменению характера поведения интенсивности и положения линий межслоевых экситонов с ростом оптической накачки.

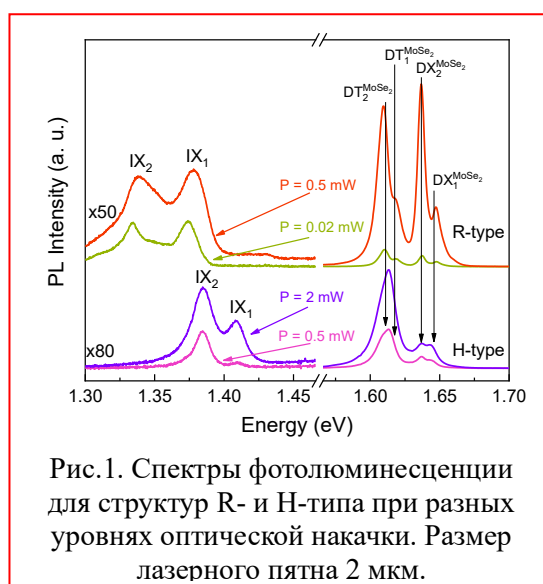


Рис.1. Спектры фотолюминесценции для структур R- и H-типа при разных уровнях оптической накачки. Размер лазерного пятна 2 мкм.

Литература

- [1] E.C. Regan et al., Nat. Rev. Mater., 7, 778 (2020).
- [2] N.P. Wilson et al., Nature, 599, 383 (2021).

Широкополосное полностью диэлектрическое зеркало, сохраняющее хиральность света

А.А. Деменив,^{1*} Н.С. Салахова,² М.К. Никонов,¹ О.А. Клименко,^{2,3} С.С. Косолюбов,² В.Н. Антонов,² В.Д. Кулаковский,¹ Н.А. Гиппиус² и С.А. Дьяков²

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

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

³Физический институт им. П.Н. Лебедева, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

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

В теоретической работе [1] была предложена простая в изготовлении структура зеркал, сохраняющих хиральность света при отражении, состоящая из фотонно-кристаллической нехиральной одномерной диэлектрической решетки на Si/SiO₂ брэгговском зеркале.

В данной работе выполнена экспериментальная реализация широкополосного широкоугольного полностью диэлектрического зеркала, сохраняющего закрученность падающего света. Изготовленное на основе оптимизации с помощью модального Фурье-метода на область вблизи 1550 нм анизотропное зеркало состояло из высококонтрастной одномерной Si решетки толщиной 230 нм с периодом 470 нм (Si-170 нм, воздух-300 нм) на подслое SiO₂ толщиной 60 нм на платформе Si/SiO₂ брэгговского зеркала с толщинами слоев Si и SiO₂ 80 и 300 нм, соответственно.

На рис.1 показана эффективность сохранения хиральности света при отражении, η , полученная на основе измерений степени циркулярной поляризации отраженного света. Видно, что для брэгговского зеркала, которое сохраняет поляризацию, но меняет знак хиральности света при отражении, $\eta \approx 0$ ($< 0.5\%$). В тоже время, анизотропное зеркало сохраняет хиральность света с эффективностью выше 98% в широком спектральном диапазоне как минимум от 1.4 до 1.65 мкм. Была отработана методика изготовления квадратных решеток разного размера и для всех решеток $\eta > 98\%$ для интересующего спектрального диапазона и для угловых апертур вплоть до 60°.

Таким образом, предлагаемое в работе простое в изготовлении анизотропное зеркало сохраняет хиральность света при отражении с эффективностью выше 98% в широкой области длин волн, превышающей 200 нм.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

Литература

[1] S.A. Dyakov *et al*, Optica 12, 1406 (2025).

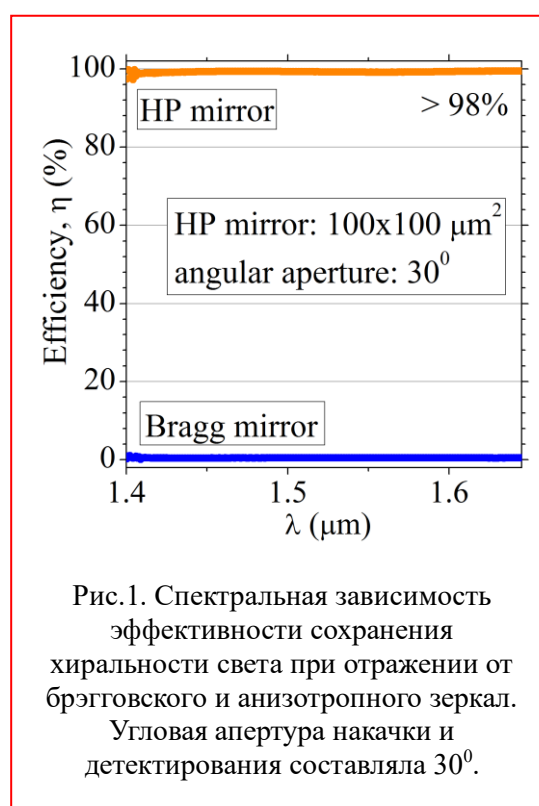


Рис.1. Спектральная зависимость эффективности сохранения хиральности света при отражении от брэгговского и анизотропного зеркал. Угловая апертура накачки и детектирования составляла 30°.

Магнитоэкситонный конденсат: расширенная фазовая диаграмма

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

Триплетный циклотронный магнитоэкситон (ТЦМЭ) в квантово-холловском диэлектрике при факторе заполнения $\nu = 2$ образован неравновесной электронной вакансией (ферми-дыркой) на полностью занятом нулевом электронном уровне Ландау и возбужденным электроном с перевернутым спином на пустом первом уровне Ландау [1, 2]. ТЦМЭ – это нижайшее по энергии возбуждение [2], представляющее собой композитный бозон со спином $S = 1$. В квантовой яме GaAs/AlGaAs с подвижностью $1.5 \cdot 10^7$ см²/В·с время жизни ТЦМЭ достигало 1 мс [3]. При температурах $T \lesssim 0.8$ К и экситонной концентрации $n_{\text{ex}} \sim (1 - 10)\%$ от плотности квантов магнитного потока в ансамбле ТЦМЭ формируется состояние электронной материи, называемое магнитоэкситонным конденсатом (МЭК) [3]. МЭК – экспериментальный пример конденсата бозонов в пространстве обобщенных импульсов q , свойства которого весьма необычны, в частности, способность быстро растекаться на макроскопические расстояния [3]. ТЦМЭ – «темные» квазичастицы, не взаимодействующие с электромагнитным полем в дипольном приближении. Для их обнаружения используется фотоиндуцированное резонансное отражение (ФРО) света, соответствующего оптическому переходу «0–0» между нулевыми уровнями Ландау тяжелой дырки в валентной зоне и электрона в зоне проводимости. ФРО детектирует неравновесные ферми-дырки, входящие в состав ТЦМЭ. Построение фазовой диаграммы «газ ТЦМЭ – МЭК» с помощью определения момента начала растекания показало, что в диапазоне $0.04 \text{ К} \lesssim T \lesssim 0.65 \text{ К}$ на границе фазового перехода n_{ex} не меняется с температурой – МЭК ведет себя как несжимаемая жидкость [4].

Особенностью ТЦМЭ является то обстоятельство, что минимум их дисперсионной зависимости находится не при $q = 0$, а в ротонном минимуме, вблизи обратной магнитной длины: $q_{\text{min}} \simeq 1/l_B \simeq 10^6$ см⁻¹ в нашем случае. С одной стороны, для энергетической релаксации нужно отдать довольно большой импульс. С другой стороны, глубина ротонного минимума составляет ~ 0.1 мэВ, т.е. при $T \lesssim 0.8$ К ТЦМЭ способны непрерывно заполнить всю область от $q = 0$ до $q \simeq 1/l_B$. Из спектров фотолюминесценции (ФЛ) следует однако, что при $T \approx 0.6$ К ансамбль ТЦМЭ в холловском диэлектрике при $\nu = 2$ состоит главным образом из экситонов с $q \approx 0$ и экситонов с $q_{\text{min}} \simeq 1/l_B$ [5]. Регистрация ФЛ с пространственным разделением пятен накачки и детектирования однозначно показывает, что именно последние осуществляют перенос экситонной плотности на сотни мкм и более [6]. Накапливание ТЦМЭ в ротонном минимуме естественно связать с началом бозе-конденсации. Таким образом открывается возможность расширить построение фазовой диаграммы «газ ТЦМЭ – МЭК» в область меньших концентраций n_{ex} .

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).
- [5] V.A. Kuznetsov, L.V. Kulik, M.D. Velikanov et al. Phys. Rev. B 98, 205303 (2018).
- [6] А.В. Горбунов, Л.В. Кулик, В.А. Кузнецов и др., Письма в ЖЭТФ 106, 651 (2017).

Прямая оптическая визуализация спиновой структуры двумерной электронной системы при $\nu = 1$

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

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: koreyev.alexis@yandex.ru

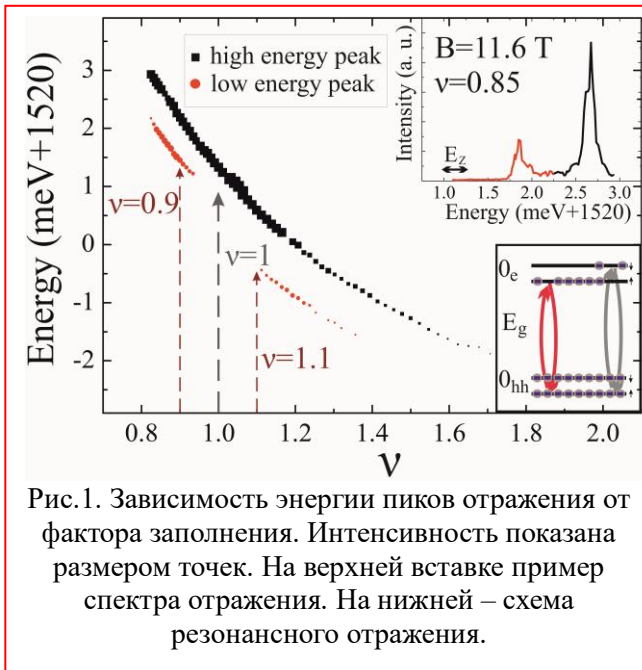


Рис.1. Зависимость энергии пиков отражения от фактора заполнения. Интенсивность показана размером точек. На верхней вставке пример спектра отражения. На нижней – схема резонансного отражения.

В двумерных электронных системах (ДЭС) в квантующем магнитном поле ключевую роль в формировании основного состояния начинает играть кулоновское взаимодействие. Это приводит к реализации широкого спектра квантовых фаз [1]. В настоящей работе методом резонансного отражения исследованы ДЭС в гетероструктурах GaAs/AlGaAs и MgZnO/ZnO в окрестности фактора заполнения $\nu = 1$.

В структуре GaAs/AlGaAs с характерной иерархией уровней Ландау обнаружены признаки спин-текстурного основного состояния (Рис. 1). Наблюдаемая картина согласуется с формированием скирмионных спиновых текстур, характерных для систем с малой зеемановской энергией.

В системе MgZnO/ZnO с сильным

кулоновским взаимодействием ($r_s \approx 7$), поведение существенно отличается. При $\nu = 1$ реализуется ферромагнитное состояние, однако по обе стороны от этого значения наблюдается выраженная асимметрия. При $\nu < 1$ система ведёт себя как холловский ферромагнетик с распределением электронов по двум перемешанным уровням Ландау. При $\nu > 1$ обнаруживаются признаки образования текстур, сопровождающиеся значительным энергетическим разрывом нижнего спинового подуровня.

Численные расчёты методом точной диагонализации показывают, что в системах GaAs/AlGaAs вблизи $\nu = 1$ формируются скирмионные структуры. В MgZnO/ZnO текстуры дополнительно вовлекают орбитальную степень свободы и возникают преимущественно при $\nu > 1$. Ранее это было установлено по спектрам коллективных возбуждений [2].

Литература

[1] J. K. Jain, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 6, 39 (2015).

[2] A. B. Van'kov et al., Phys. Rev. B 106, 245308 (2022).

Дисперсия и эволюция запрещенных зон в трехмерных слоистых плазмонных кристаллах

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

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

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

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

Периодические металлические структуры обладают способностью имитировать различные материалы, свойства которых не существуют для природных аналогов. Мы реализуем простую технологию сборки 3D-метаматериала, состоящего из стопки высокоомных кремниевых чипов с литографически нанесенными металлическими сетками. Они образуют трёхмерный слоистый плазмонный кристалл, работающий в терагерцовом диапазоне частот.

Оказалось, что отклик плазмонного кристалла может быть описан в терминах эффективной диэлектрической проницаемости. Ниже эффективной плазменной частоты метаматериал демонстрирует нулевое пропускание. Выше этой частоты возникает последовательность резонансов Фабри–Перо, позволяющая определить дисперсию структуры. Периодическая структура плазмонного метаматериала обеспечивает возникновение зон, имеющих супердисперсию $\partial\epsilon/\partial f$, в пределе малых периодов сетки. Для больших периодов дисперсия электромагнитной волны в метаматериале близка к плазменной зависимости, причём плазменная частота определяется геометрическими параметрами сетки и толщиной чипа [1-2].

Слоистая периодическая структура не только сохраняет свои свойства эффективной среды, но и проявляет поведение фотонного кристалла: приводит к формированию чётко выраженных зон. Мы экспериментально исследуем эволюцию первой и второй запрещённых зон в широком диапазоне геометрий и устанавливаем их связь как с поведением эффективной среды, так и с дисперсией фотонного кристалла. Результаты показывают, что первая запрещённая зона отклоняется от теоретических предсказаний и демонстрирует характеристики слабой связи даже при коэффициентах заполнения металлом до 20%. Напротив, вторая запрещённая зона следует ожидаемому дисперсионному соотношению для волн, распространяющихся в эффективной среде, определяемой сеткой. Эти данные подчёркивают сложное взаимодействие между плазмонным откликом и периодичностью в слоистых системах. Представленные результаты также обеспечивают применение для инженерии ТГц-дисперсии и зонной структуры с потенциальными применениями в перестраиваемых фильтрах, детекторах и компактных ТГц-фотонных устройствах.

Литература

- [1] V. M. Muravev, K. R. Dzhikirba, M. S. Sokolova, A. S. Astrakhantseva, and I. V. Kukushkin Superdispersive Plasmonic Metamaterial, *Phys. Rev. Appl.* 21, 034041 (2024).
- [2] V. M. Muravev, K. R. Dzhikirba, P. A. Gusikhin, A. S. Astrakhantseva, M. S. Sokolova, and I. V. Kukushkin, Plasmonic Fabry-Perot Resonator for Enhanced Terahertz Detection, *Phys. Rev. Appl.* 23, 014060 (2025)

Плазменный отклик слоистой системы из двумерных электронных слоёв

К.Р.Джикирба,* И.В.Кукушкин, В.М.Муравьев*ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: dzhikirba.kr@phystech.edu*

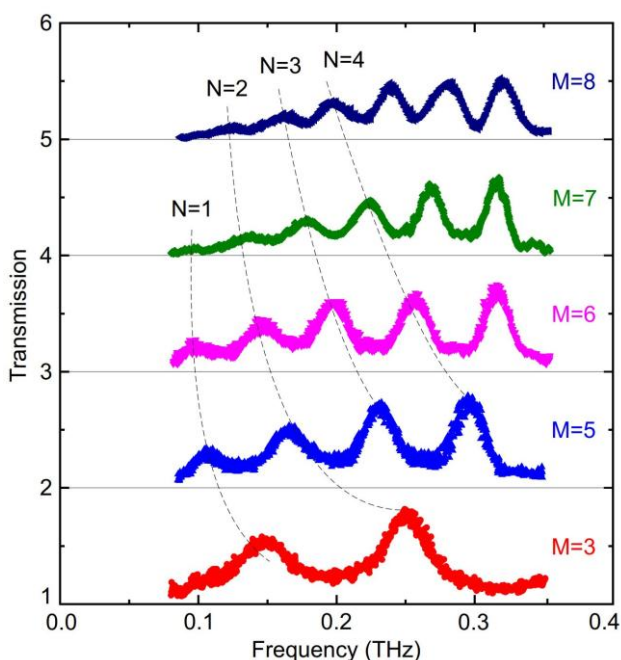
Электродинамические свойства объёмного электронного газа традиционно служат базой для описания широкого круга физических систем — от классической плазмы до вырожденных электронов проводимости в металлах. По аналогии, двумерные электронные системы (ДЭС) стали ключевым объектом изучения физики низкоразмерных систем в полупроводниковых гетероструктурах [1], а также поверхностных электронов на жидком гелии. Важно, что плазменные возбуждения в трёхмерном (3D) и двумерном (2D) случаях обладают принципиально различными свойствами. Двумерный заряженный слой не способен эффективно экранировать пробный заряд из-за проникновения электромагнитных полей в окружающую ДЭС среду. Одним из следствий является бесщелевой характер спектра двумерных плазменных колебаний.

Особый интерес представляет слоистая ДЭС [2]. Такая система занимает промежуточное положение между 2D и 3D конфигурациями, представляя собой регулярный массив параллельных электронных слоёв. Это позволяет детально проследить переходное поведение между режимами плазмоники различной размерности. Кроме того, такие структуры служат модельными объектами для описания плазменных свойств природных и искусственных слоистых материалов, включая многослойный графен и дихалькогениды переходных металлов.

В настоящей работе разработана и реализована простая технология сборки трёхмерного слоистого плазменного материала на основе стопки чипов GaAs с двумерным электронным газом на поверхности каждого чипа. Образцы были изготовлены из промышленных гетероструктур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Квантовая яма GaAs содержит двумерную электронную систему с двумерной плотностью $n_s = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью электронов $m = 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$ при $T = 5 \text{ К}$. С использованием спектроскопии резонансов Фабри—Перо экспериментально измерена дисперсия электромагнитных волн, распространяющихся в полученной структуре. Показано, что в низкочастотном пределе дисперсия описывается эффективной диэлектрической проницаемостью, характерной для 3D плазмы.

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 Apr 2;126(13):136801
 [2] V. Muravev, K. Dzhikirba, M. Sokolova, A. Astrakhantseva, and I. Kukushkin, “Superdispersive plasmonic metamaterial,” Phys. Rev. Appl., vol. 21, p. 034041, Mar 2024.



Эффект интерфейса в тонких пленках бинарных сплавов и его применение

Д.В. Новиков,¹ Л.С. Волкова,^{1,2} С.В. Дубков,¹ С.А. Гаврилов,¹ Д.Г. Громов¹¹НИУ «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1²ИНМЭ РАН, 119049, Москва, Нагатинская ул., 16А, стр.11

*e-mail: gromadima@gmail.com

Тонкие пленки бинарных сплавов находят различное применение: в качестве контактных систем в микроэлектронике, в качестве катализатора роста углеродных нанотрубок, в качестве самовосстанавливающихся покрытий, в качестве активируемых слоев оптических сенсоров на эффекте гигантского комбинационного рассеяния и, вероятно, в качестве других. Все эти применения возможны благодаря «эффекту интерфейса», который проявляется в том, что интерфейс (в виде поверхности твердого тела, межфазной границы, границы зерен) из-за избыточной поверхностной энергии является стоком для атомов «подвижного» или поверхностно-активного компонента бинарного (или многокомпонентного) сплава.

Рассматриваются примеры поведения бинарных сплавов при наличии реактивного стока подвижного компонента на границу раздела фаз. Такого рода примерами является взаимодействие тонких пленок бинарных сплавов с кремниевой подложкой, что использовалось для формирования мелких контактов для технологии микроэлектроники.

Другими примерами являются процессы формирования массивов наночастиц катализатора для роста углеродных нанотрубок (УНТ), в которых сток подвижного компонента сплава, который, в то же время, является катализатором роста, идет на поверхность пленки сплава. Демонстрируется, что данный процесс позволяет, в конечном итоге, управлять диаметром УНТ.

На аналогичном подходе основан процесс формирования массива наночастиц плазмонного металла на поверхности пленки многокомпонентного сплава (рис. 1) для оптических сенсоров на эффекте гигантского комбинационного рассеяния.

Выбор составов сплава обосновывается с позиции поверхностной энергии и теплоты сублимации компонентов.

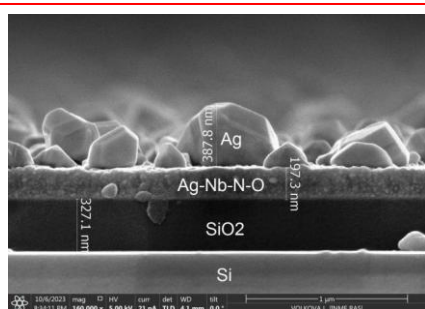


Рис.1. Профиль пленки Ag-Nb-N-O толщиной 250 нм после отжига в вакууме при 400 °С.

Работа выполнена в рамках государственного задания FSMR-2023-0003. Формирование пленок производилось в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные метериалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Матричный амплитудный модулятор терагерцового излучения на основе перестраиваемой метаповерхности

А.А. Титенко,^{1*} В.Д. Бобова,¹ М.С. Соколова,^{1,3} С.М. Макаровская,¹ В.В. Соловьев,¹ В.В. Старцев,⁴ И.В. Кукушкин,¹ В.М. Муравьев^{1,2}

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

²ФГУП «ВНИИФТРИ», 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корп. 11

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

⁴АО «НПО «Орион»», 111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 2/46

*e-mail: toliatitenko@gmail.com

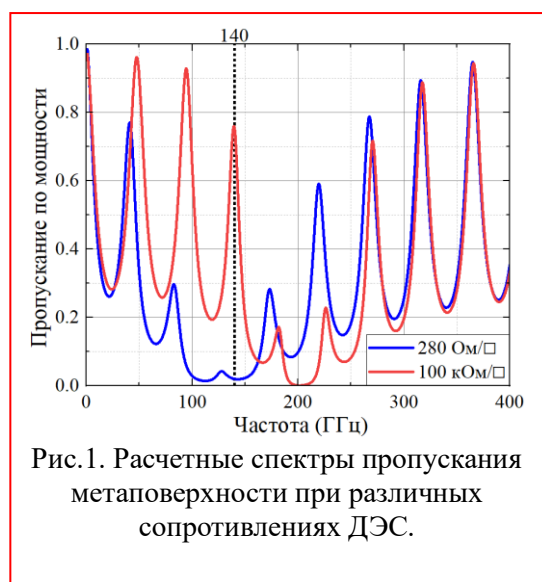


Рис.1. Расчетные спектры пропускания метаповерхности при различных сопротивлениях ДЭС.

В работе представлена архитектура матричного амплитудного модулятора терагерцового излучения на основе перестраиваемой метаповерхности. Структура состоит из кремниевой подложки толщиной 850 мкм, на которой выращена гетероструктура AlGaIn/GaN с двумерной электронной системой (ДЭС), формирующейся на границе гетероперехода. На поверхности гетероструктуры методами фотолитографии формируется металлический рисунок, образующий метаповерхность.

Модулятор реализован в виде матрицы 4×4 пикселей с размерами одного пикселя 2,08 × 1,995 мм и периодом расположения пикселей 2,28 × 2,15 мм. Каждый пиксель представляет собой массив транзисторных структур, затворы которых объединены общей контактной шиной, при этом все

пиксели имеют общую заземляющую шину, что обеспечивает возможность их независимого управления.

Физический принцип работы модулятора основан на изменении проводимости ДЭС под действием управляющего напряжения, что приводит к изменению условий возбуждения резонансных токов в метаповерхности и перестройке спектрального положения резонансных минимумов пропускания.

На основе численного электродинамического моделирования показано, что спектральный отклик определяется как геометрическими параметрами структуры, так и толщиной подложки, влияющей на положение интерференционных (Фабри–Перо) резонансов. За счет оптимизации этих параметров обеспечивается смещение рабочей частоты модуляции в область порядка 140 ГГц (рис. 1).

Предлагаемая архитектура обеспечивает возможность формирования пространственно неоднородных распределений амплитуды терагерцового излучения и может быть использована при разработке устройств для систем визуализации и беспроводной связи.

Волноводно-плазмонные моды для газоанализа

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

Исследовалось прохождение лазерного излучения через кварцевый капилляр длиной 40 см с серебряным напылением внутри 300 мкм полости.

Использовался импульсный титан-сапфировый лазер (Tsunami 3800), перестраиваемый по длине волны, на длинах волн 800 и 400 нм. Лазерный пучок фокусировался на входной торец капилляра с помощью объектива или асферической линзы. Также, использовался параллельный лазерный пучок, прошедший сквозь калиброванную по размеру пин-хол диафрагму. Изображение (имидж) выходного торца капилляра передавалось на вход имидж-спектрометра (Acton 2500i) с помощью оптической системы из двух линз с примерно 10-кратным увеличением. Имидж торца капилляра регистрировался азотно-охлаждаемой ПЗС камерой (Roper Scientific). Для изучения времени прохождения лазерного излучения сквозь капилляр применялась скоростная камера (стрик-камера Hamamatsu).

В представленном эксперименте изучалась модовая структура электромагнитного поля прошедшего лазерного излучения внутри капилляра в зависимости от размера отверстия пин-хол диафрагмы и угла вхождения лазерного пучка в полость капилляра. Измерялось время прохождения разных пространственных мод внутри капилляра в зависимости от угла их возбуждения. Исследовалась модовая структура света внутри капилляра в зависимости от когерентности лазерного излучения. Было обнаружено, что время прохождения разных пространственных мод не зависит от способа их возбуждения и совпадает со скоростью света (с точностью аппаратной функции стрик-камеры – порядка 6 псек). Этот факт указывает на плазмонную природу распространения электромагнитных волн внутри капилляра, а полученные изображения выходного торца капилляра отражают структуру волновой функции плазмона (рис.1).

Проведенные эксперименты важны для понимания процессов комбинационного рассеяния (КР) света в таких капиллярах, что важно для измерения различных газовых смесей на практике [1,2].

[1] M.N. Khannanov, A.B. Van'kov, A.A. Novikov, A.P. Semenov, P.A. Gushchin, S.I. Gubarev, V.E. Kirpichev, E.N. Morozova, L.V. Kulik, Igor V. Kukushkin, *Applied Spectrosc.* 74(12), pp. 1496-1504 (2020).

[2] M.N. Khannanov, A.B. Van'kov, V.E. Kirpichev, L.V. Kulik, Igor V. Kukushkin, *IEEE Sensors Journal*, v.21 (21), pp. 24142-24148 (2021).

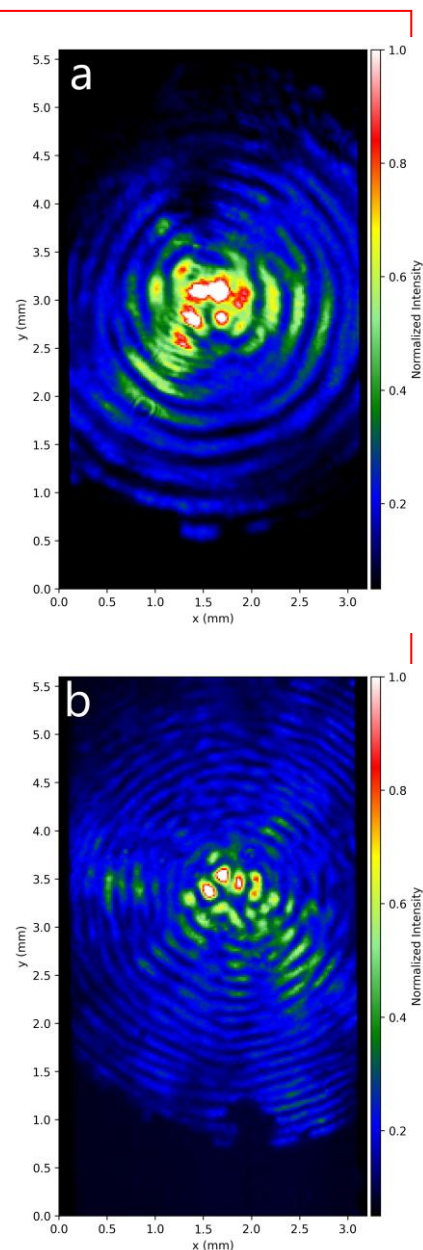


Рис.1. ПЗС-имидж торца кварцевого капилляра с серебряным напылением при возбуждении импульсным титан-сапфировым лазером с длиной волны 800 (а) и 400 (б) нм.

Плазмоны в латерально ограниченных анизотропных и сильно экранированных двумерных электронных системах

И. В. Загороднев,* Д. А. Родионов

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

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

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

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-22-00450.

Литература

- [1] S. Ahn, S. Das Sarma, Phys. Rev. B 103, L041303 (2021).
- [2] A.R. Khisameeva et al., Appl. Phys. Lett. 117, 093102 (2020).
- [3] Д.А. Родионов, И.В. Загороднев, Письма в ЖЭТФ 118, 90 (2023).
- [4] D.A. Rodionov, I.V. Zagorodnev, Phys. Rev. B 112, 075418 (2025).

Эффект увлечения в двумерной проводящей полосе при магнитоплазменных частотах

Д.А. Родионов, * И.В. Загороднев

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

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

Проведено теоретическое исследование эффекта увлечения импульса монохроматической линейно поляризованной волны в проводящей двумерной полосе при частотах возбуждения магнитоплазмонов. Полоса располагается на диэлектрической подложке толщиной d с проницаемостью ε . На обратной стороне подложки расположен идеально проводящий металлический электрод. Вся система находится в перпендикулярном постоянном однородном магнитном поле. Рассматривается предел сильного экранирования, когда расстояние до металла много меньше ширины полосы W и характерной длины волны возбуждаемых магнитоплазмонов. Для описания динамики электронов решалось уравнение Эйлера совместно с уравнением Пуассона. Рассматривался квазистатический предел колебаний, когда длина волны возбуждающего поля много больше ширины полосы.

Интегральный фототок вдоль полосы и фотонапряжение между её краями имеют резонансный характер как функции частоты. При возбуждении высокочастотных магнитоплазмонов, т.е. при частотах много больших обратного характерного времени рассеяния носителей в системе γ , положение этих резонансов совпадает с частотой магнитоплазмона, а их полуширина с их темпом затухания. Квадрат частоты резонансов есть $v_{pl}^2 (n\pi/W)^2 + \omega_c^2$, где n – номер плазменной моды, $v_{pl}^2 = 4\pi d n_s e^2 / \varepsilon m$ – квадрат групповой скорости плазмона (e, m, n_s – заряд, масса, двумерная концентрация электронов), ω_c – циклотронная частота носителей заряда [1]. Полуширина резонанса изменяется от значения $\gamma/2$ в отсутствие магнитного поля до γ с увеличением величины магнитного поля.

Установлено, что отношение фотонапряжения и фототока при магнитоплазменной частоте равна холловскому сопротивлению. В отсутствие магнитного поля фототок в системе существенно зависит от азимутального угла и поляризации падающей волны. В слабом магнитном поле, т.е. $\omega_c \ll v_{pl}(n\pi/W)$, появляется добавка к фототоку, которая квадратична по полю и при некоторых углах падения и поляризациях может быть отрицательной. Например, для волны только с тангенциальной компонентой волнового вектора вдоль полосы эта добавка положительна при р-поляризации и отрицательна при s-поляризации. С дальнейшим увеличением магнитного поля значение тока увеличивается. Так при больших классических магнитных полях, т.е. при $\omega_c \gg v_{pl}(n\pi/W)$, ток имеет квадратичную зависимость от магнитного поля. Таким образом при некоторых направлениях волнового вектора и поляризациях падающей волны величина фототока может иметь минимум по магнитному полю. При этом фотонапряжение является монотонно возрастающей функцией магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-22-00450.

Литература

- [1] I.V. Zagorodnev, A.A. Zabolotnykh, D.A. Rodionov, V.A. Volkov, *Nanomaterials* 13, 975 (2023).

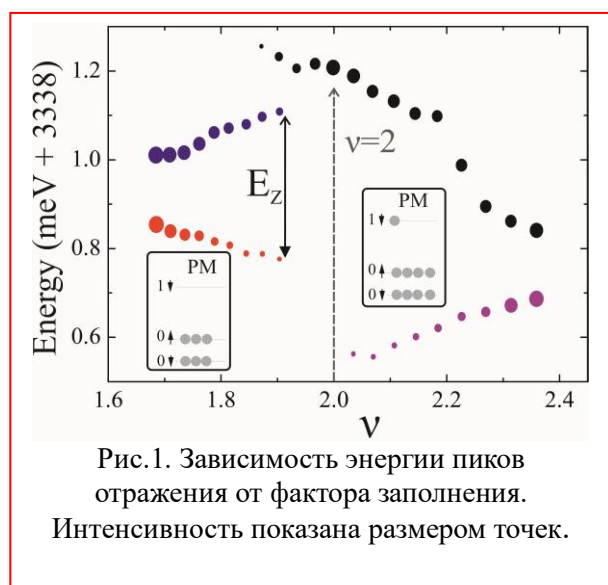
Оптическое исследование спинового упорядочения в двумерной электронной системе MgZnO/ZnO в окрестности фактора заполнения $\nu = 2$

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

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



В двумерных электронных системах (ДЭС) в квантующих магнитных полях конкуренция зеемановской, циклотронной и кулоновской энергий определяет характер спинового упорядочения. В окрестности фактора заполнения $\nu = 2$ система может переходить между парамагнитным и ферромагнитным состояниями, что сопровождается существенной перестройкой спектра уровней Ландау и коллективных возбуждений.

В настоящей работе методом резонансного отражения света [1] исследована двумерная электронная система в гетероструктуре MgZnO/ZnO в окрестности $\nu = 2$ при температурах до 40 мК в магнитных полях до 14 Т. Дополнительно варьировался угол наклона магнитного поля, что позволяло

изменять величину зеемановского расщепления независимо от циклотронного.

При точном целочисленном заполнении $\nu = 2$ в спектре наблюдается единственная отражательная мода, соответствующая полностью заполненной электронной системе. При отклонении от $\nu = 2$ в спектре появляются дополнительные низкоэнергетические моды, интенсивность которых возрастает по мере удаления от целочисленного значения. При $\nu < 2$ наблюдается расщепление отражательной моды, связанное с заполнением близких по энергии уровней Ландау.

Увеличение угла наклона магнитного поля приводит к сближению спектральных мод и их последующему объединению в одну линию, что указывает на переход системы в полностью спин-поляризованное состояние [2]. Вблизи точки ферромагнитного перехода наблюдается скачкообразное изменение энергии мод и перераспределение их интенсивностей, что свидетельствует о перемешивании уровней Ландау и коллективной природе перехода.

Полученные результаты демонстрируют, что в окрестности $\nu = 2$ реализуется сложная картина спинового упорядочения, определяемая конкуренцией зеемановской энергии и кулоновских корреляций.

Литература

- [1] L. V. Kulik et al, Magnetofermionic condensate in two dimensions, Nature Communications vol. 7, 13499 (2016).
- [2] A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin, Optical manifestation of the Stoner ferromagnetic transition in two-dimensional electron systems, Phys. Rev. B 96, 235401 (2017).

Влияние параллельной компоненты магнитного поля на туннелирование между слоями двухслойной электронной системы в широкой квантовой яме GaAs

А.А. Капустин,* С.И. Дорожкин

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

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

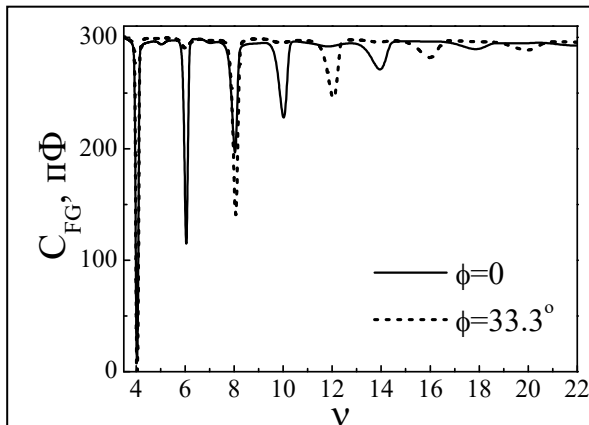


Рис.1. Минимумы магнетоёмкости C_{FG} , измеренной между электронной системой и верхним затвором FG, напылённым на поверхность образца, демонстрирующие различное поведение при наклоне магнитного поля относительно нормали к плоскости КЯ. Состояния КЭХ в минимумах, которые при наклоне углубляются, соседствуют с другими, которые уменьшаются по глубине. Измерения выполнены в условиях существования двух слоев электронов около противоположных стенок КЯ. $T=0.5K$.

В двухслойной электронной системе (ЭС) в широкой квантовой яме (КЯ) GaAs ($w=50\text{nm}$), помещенной между двумя затворами, обнаружена неожиданная зависимость минимумов магнетоёмкости, соответствующих состояниям КЭХ, от угла наклона ϕ магнитного поля относительно нормали к ЭС. Оказалось, что увеличение ϕ приводит к углублению минимумов на факторах заполнения уровней Ландау $\nu=4N$, $N=1,2,3, \dots$, и к уменьшению глубин минимумов на соседних факторах заполнения $\nu=4N+2$ (Рис.1). ν определяется суммарной концентрацией электронов в обоих слоях ЭС. Такое же поведение демонстрируют минимумы $\rho_{xx}(B)$, но этот эффект наблюдать труднее в силу малых величин магнетосопротивления в минимумах КЭХ. Эффект удастся объяснить влиянием параллельной компоненты магнитного поля на туннелирование между слоями электронов [1], определяющее величину межподзонного расщепления. При небольших ϕ это расщепление уменьшается, что приводит к увеличению энергетических щелей в состояниях КЭХ при $\nu=4N$ и их уменьшению при $\nu=4N+2$. В более широких, чем наши, КЯ ($58\text{nm} \leq w \leq 70\text{nm}$) в работе [2] было обнаружено, что увеличение ϕ приводит к немонотонному изменению глубин минимумов $\rho_{xx}(B)$, соответствующих другим

факторам заполнения $\nu=4N+1$ и $\nu=4N+3$. В этой работе, выполненной при $T=20\text{ mK}$, основное внимание было уделено небольшим энергетическим расщеплениям при нечетных ν и эффекты, связанные с большими щелями при четных ν , выпали из внимания.

Литература

- [1] J. Hu and A.H. MacDonald, Physical Review B 46, 12554 (1992). [2] D.R. Luhman, W. Pan, T.M. Lu, D.C Tsui, L.N. Pfeiffer, K.W. Baldwin, K.W. West, International Journal of Modern Physics B 23, 2808 (2009).

Соотношение ширины линий плазменного и циклотронного резонансов

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

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

²*Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр.7*

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

Исследование плазменных возбуждений в двумерных электронных системах (ДЭС) в настоящее время представляет особый интерес в контексте развития физики метаматериалов и разработки терагерцовых электронных устройств. Одной из ключевых характеристик двумерных плазменных возбуждений является возможность перестроения резонансной частоты, в том числе за счет внешних электрического или магнитного полей. В этой связи актуальным становится вопрос о свойствах магнитоплазменных мод в условиях приложения внешнего магнитного поля и гибридизации плазменной волны с циклотронным резонансом. Несмотря на хорошо изученные частотные свойства таких возбуждений, вопрос о механизмах затухания и, в частности, о ширине линии плазменного резонанса остается недостаточно исследованным. В настоящей работе нами экспериментально продемонстрировано двукратное увеличение ширины линии плазменного резонанса при приложении внешнего магнитного поля, согласующееся с теоретическими ожиданиями.

Экспериментальное исследование двумерных плазменных возбуждений проводилось на полупроводниковых гетероструктурах GaAs/AlGaAs с содержащей ДЭС квантовой ямой. Концентрация двумерных электронов в яме составляла $n_s = 0.35 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, тогда как подвижность достигала $\mu = 0.5 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T = 4.2 \text{ К}$. ДЭС на исследованных образцах была организована в виде мезоструктур, имеющих форму диска с диаметром $d = 700 \text{ мкм}$. Исследование спектров резонансного микроволнового поглощения осуществлялось при $T = 4.2 \text{ К}$ с использованием бесконтактной оптической методики, основанной на высокой чувствительности спектра рекомбинационной фотолюминесценции к даже слабому разогреву ДЭС в GaAs [1].

В работе продемонстрировано, что ширина линии объемной магнитоплазменной моды существенно возрастает с увеличением магнитного поля, демонстрируя переход от значения порядка $1/\tau$ в отсутствие поля к $2/\tau$ в сильных полях. Наблюдаемая магнитополевая зависимость ширины резонанса качественно и количественно согласуется с разработанной аналитической моделью, учитывающей изменение соотношения кинетической и потенциальной энергии коллективных возбуждений при приложении магнитного поля. Показано, что основной вклад в уширение линии плазменного резонанса обусловлен столкновительным затуханием, тогда как радиационные потери играют второстепенную роль.

Литература

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

Поляризационные свойства отражения от диэлектрического зеркала, сохраняющего хиральность света

М.К. Никонов,^{1*} С.А. Дьяков,² Н.С. Салахова,² А.А. Деменев,¹ О.А. Клименко,^{2,3} С.С. Косолюбов,² В.Н. Антонов,² В.Д. Кулаковский¹ и Н.А. Гиппиус²

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

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

³Физический институт им. П.Н. Лебедева, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

*e-mail: nikonov.mk@issp.ac.ru

В работе [1] впервые была представлена структура резонатора Фабри-Перо из диэлектрических зеркал, сохраняющих хиральность света при отражении и состоящих из фотонно-кристаллических ахиральных одномерных диэлектрических решёток. В данной работе изготовлено подобное анизотропное зеркало и исследованы поляризационные свойства отражённого света. Зеркало состояло из одномерной Si решётки толщиной 290 нм с периодом 650 нм (Si – 150 нм, воздух – 500 нм) на подслое SiO₂ толщиной 60 нм на платформе Si/SiO₂ брэгговского зеркала с толщинами слоев Si и SiO₂ 115 и 260 нм, соответственно.

На рис. 1 показана спектральная зависимость степени линейной (DLP) и циркулярной (DCP) поляризации отражённого света при накачке линейной и циркулярной поляризацией, соответственно. При освещении линейно-поляризованным светом отражение также имеет линейную поляризацию со степенью DLP > 0.99 в диапазоне длин волн 1.42–1.65 мкм, однако направление поляризации поворачивается на угол 2φ , где φ – угол между поляризацией падающего света и направлением штрихов решётки. В случае циркулярной накачки, при отражении поляризация меняется на противоположную с DCP < -0.98 в диапазоне 1.54–1.65 мкм. На рис. 1 при циркулярной накачке видны резонансы, связанные с возбуждением волноводных мод в слоях Si брэгговского зеркала.

Таким образом, исследованное анизотропное зеркало преобразует циркулярную поляризацию падающего света в ортогональную с высокой эффективностью и сохраняет линейную поляризацию, однако вращает плоскость поляризации подобно пластине $\lambda/2$.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН.

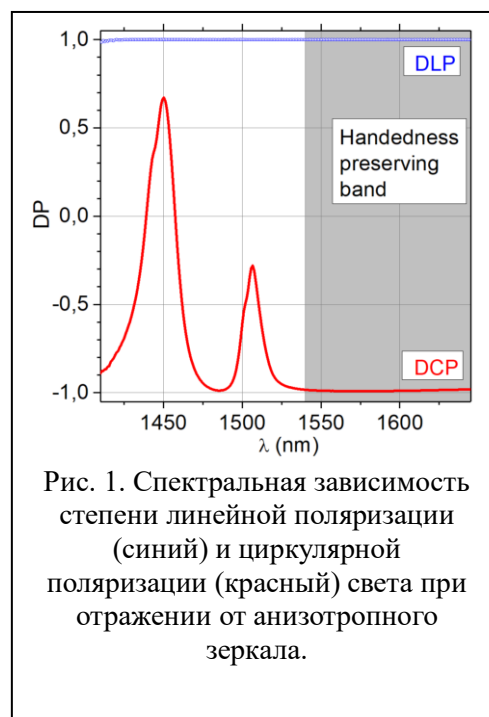


Рис. 1. Спектральная зависимость степени линейной поляризации (синий) и циркулярной поляризации (красный) света при отражении от анизотропного зеркала.

Литература

[1] Dyakov S.A., *et al.* Advanced Optical Materials, 12 (2024).

Пространственная визуализация плазменных колебаний в двумерной электронной системе в форме диска

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 университет), 141700 Долгопрудный, Россия*

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

Долгое время анализ пространственного распределения полей в плазмоне был возможен лишь теоретически или численно [1,2]. Среди экспериментальных результатов, посвященных данной задаче в ДЭС, особого внимания заслуживает работа Баскина и Ашкинадзе [3]. В ней были получены профили разогрева электронов вдоль одной пространственной оси, демонстрирующие периодический характер. Полученная длина волны плазмона количественно соотносилась с теоретической. В основе предложенной авторами методики лежал анализ изменения спектра рекомбинационной люминесценции двумерных электронов и дырок при микроволновом поглощении. Настоящая работа опирается на данную оптическую методику детектирования плазменных возбуждений и ставит своей целью получение тепловой карты величины токов двумерных электронов во всей плоскости системы.

Исследовался диск диаметром $d=700$ мкм из высокоподвижной ДЭС на основе квантовой ямы GaAs/AlGaAs, помещенный в разрез копланарного волновода. Измерения проводились в криогенной зондовой станции LakeShore TTP4, в противоположные плечи которой были помещены РЧ-зонды, а в одно из оставшихся – оптический с диаметром световода 100 мкм. Плазмон в диске возбуждался с помощью копланарной методики. Для получения S-параметров исследуемого образца использовался ВАЦ до 44 ГГц. Величина разогрева ДЭС в заданной точке диска при возбуждении плазменных колебаний определялась как интеграл разности спектров рекомбинационной люминесценции двумерных электронов и дырок в присутствии микроволнового излучения и без него. Сканирование поверхности диска проводилось на высоте 30 мкм над образцом с шагом 50 мкм.

Анализ пропускания копланарного волновода позволил определить фундаментальную плазменную моду в диске. Ее частота составила 12.5 ГГц. Механическим сканированием поверхности образца оптическим зондом были получены распределения разогрева двумерной системы на наборе частот. Результаты демонстрируют количественное соответствие с численным моделированием методом конечных элементов и открывают новые возможности для исследования двумерной холодной плазмы.

Литература

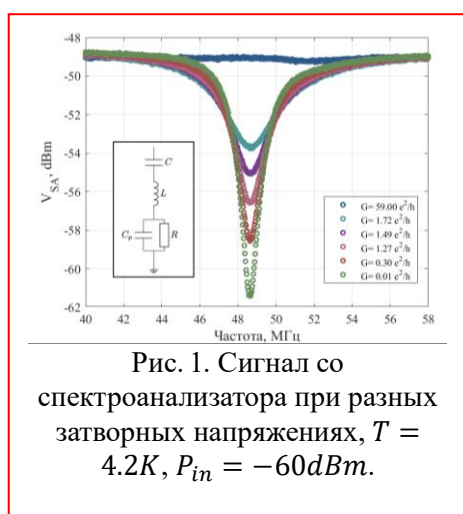
- [1] Forestiere C. et al. Phys. Rev. B, 99, 155423 (2019).
- [2] Smajic J. et al., Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 6, 3 (2009).
- [3] Baskin I. et al., Phys. Rev. B, 84, 041305 (2011).

Радиочастотное измерение квантового точечного контакта

С.С. Пуховикова,^{1,2*} Е. С. Тихонов¹¹ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 20

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

Явления в квантовых устройствах являются динамическими, поэтому их нельзя изучать, используя измерения усредненных по времени величин. Пример такого явления - изменение зарядового состояния квантовой точки (КТ) вблизи одноэлектронного режима.



Детектирование электронных переходов можно реализовать следующим образом: на чипе рядом с КТ располагается детектор, кондактанс которого зависит от электростатического окружения. Тогда, добавление или уход очередного электрона из КТ, меняя электрическое поле вблизи точки, будет проявляться в изменении кондактанса расположенного рядом с ней детектора. Мы собираемся реализовать методику радиочастотных измерений с использованием КТК в качестве детектора [1].

При работе на постоянном токе, скорость измерения кондактанса КТК ограничена RC фильтром. Его полоса пропускания $f_{RC} = 1/(2\pi RC)$ определяется сопротивлением контакта ($R \approx 25\text{ кОм}$), в этой области сопротивлений КТК имеет максимальную чувствительность к электростатическому окружению, и паразитной емкостью

кабелей ($C = 0.1 - 1\text{ нФ}$). При таких значениях параметров полоса пропускания составляет 6-60 кГц. Как следствие, процессы, происходящие на масштабе времени, меньшем чем десятки микросекунд, не будут задетектированы.

Поскольку импеданс КТК зависит от состояния КТ, то, детектируя изменения в мощности сигнала, прошедшего через КТК, можно судить об изменении его кондактанса, а значит, и о переходах в самой КТ. Однако возникает следующая проблема: импеданс КТК составляет несколько десятков кОм, и при таких значениях цепь оказывается сильно рассогласованной, а прошедший сигнал слабым. Естественное решение - воспользоваться известным из науки об электрических цепях методом согласования импедансов цепи [2]. Стоит отметить, что таким методом можно измерять как прошедший, так и отражённый сигнал (хотя в нашей схеме отсутствует направленный ответвитель, необходимый для детектирования отражённого сигнала). Результаты измерений представлены на рис. 1: на резонансной частоте сигнал, прошедший через КТК, чувствует изменения его кондактанса, схема резонансного контура показана на вставке.

Литература

- [1] Reilly D. J. [et al.]. Fast single-charge sensing with an rf quantum point contact // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. № 16. P. 162101.
 [2] Vigneau F. [et al.]. Probing quantum devices with radio-frequency reflectometry // Appl. Phys. Rev. 2023. V. 10. № 2. P. 021305.

Энергии связи и потенциальные энергии межслоевых и внутрислоевых экситонов в муаровой сверхрешетке гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$

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*

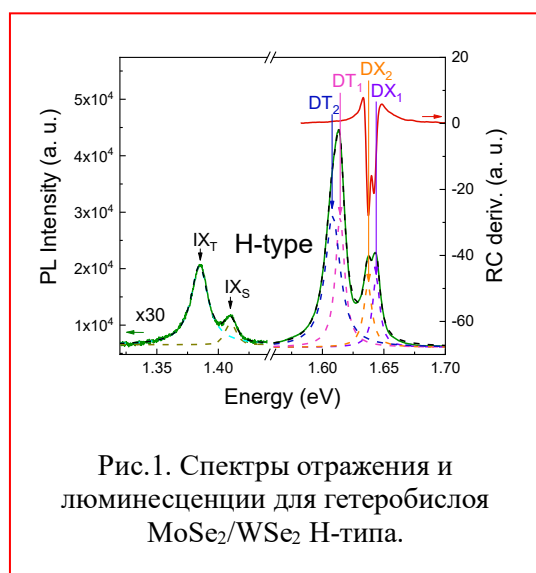


Рис.1. Спектры отражения и люминесценции для гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ H-типа.

Гетероструктуры на основе гетеробислоев ДМП обладают особыми свойствами – образуют муаровые сверхрешетки [1,2]. Для $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ и углах поворота 0.5-2 градуса оценка периода муара ~ 10 -100 нм. Небольшой угол поворота или несовпадение периодов решеток монослоев приводят к периодическому изменению взаимного расположения слоев (типа упаковки) и межслоевого расстояния, что может приводить к локализации экситонов и изменению правил отбора для оптических переходов. Экситоны в таких системах могут быть межслоевыми или внутрислоевыми, а их спектральные положения зависят от энергии связи и зонной структуры. Большой период муара позволяет использовать локальное приближение при расчете зонной структуры и экситонных свойств гетеробислоев. Зависимость потенциальной энергии экситонов от

координат в реальном пространстве существует как для межслоевых, так и для внутрислоевых экситонов, но для последних гораздо слабее [3]. В данной работе были проведены расчеты энергии связи межслоевых и внутрислоевых экситонов, прямых в импульсном пространстве для трех видов кулоновского взаимодействия [4-6] в бислоях $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ в зависимости от расстояния между слоями. Определена наиболее подходящая модель кулоновского взаимодействия в гетеробислоях. Показано, что зависимость энергии связи от межслоевого расстояния незначительна. Были исследованы экспериментально спектры отражения для внутрислоевых экситонов от гетеробислоев $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ и монослоев MoSe_2 , инкапсулированных hBN. Метод микрофотолюминесценции использовался для одновременного изучения внутрислоевых и межслоевых экситонов в гетеробислоях $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ H-типа (рис. 1) и R-типа. Сравнение полученных экспериментальных результатов, проведенных расчетов энергии экситонов и зонной структуры позволило изучить влияние муаровой структуры на внутрислоевые экситоны в сравнении с экситонами в монослое, оценить ее влияние на различные типы экситонов, а также сделать выводы относительно взаимной ориентации слоев.

Литература

- [1] Emma C. Regan et al., Nature review/Materials, 7, 779 (2022).
- [2] Nathan P. Wilson, Wang Yao, Jie Shan, Xiaodong Xu. Nature, 599, 383 (202).
- [3] H. Yu, G.-B. Liu, J. Tang, X. Xu and W. Yao. Sci. Adv. 3, e1701696 (2017).
- [4] N.A. Asriyan et al., Phys.Rev. B99, 085108 (2019). М.А. Семина, ФТТ, 61, 2234 (1019).
- [5] H.C. Kambal, T.G. Pedersen. Scientific Reports 10, 36-40 5537 (2020).
- [6] P. Kapuscinski et al., Phys. Rev. B110, 155439 (2024).

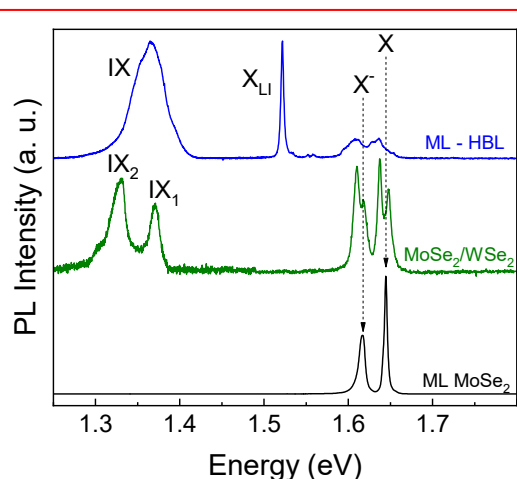
Краевой экситон на границе монослоя MoSe_2 и бислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ **А.С. Бричкин,* Г.М. Голышков, В.Е. Бисти***ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, 142432, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2***e-mail: brich@issp.ac.ru*

Рис.1. Спектры ФЛ с одиночного монослоя MoSe_2 (черная), гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ (зеленая) и границы MoSe_2 и $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ (синяя) при $T=10\text{K}$.

Монослои и бислои дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) привлекают большой интерес исследователей благодаря своим уникальным экситонным (большая энергия связи) и оптическим (прямая запрещенная зона в видимом диапазоне) свойствам. В бислоях помимо обычных (внутрислоевых) экситонов существуют межслоевые экситоны, обладающие дипольным моментом, перпендикулярным плоскости слоя [1]. Гораздо менее развита тема латеральных гетероструктур, где два монослойных материала ДПМ ковалентно связываются в плоскости. Существование одномерных экситонов, в которых электроны и дырки находятся по разные стороны границы гетероперехода и обладают дипольным моментом в плоскости перпендикулярно границе, предсказывалось в теоретических работах, однако их существование по-прежнему требует экспериментального подтверждения [2].

В данной работе представлено исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) в hBN-инкапсулированных гетеробислоях $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$. На границе монослоя MoSe_2 и гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$, образуется квази-латеральная гетероструктура $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ и наблюдается линия ФЛ, имеющая отчетливые признаки экситона с диполем в плоскости, в соответствии с предсказаниями теоретического моделирования [2]. На рис.1 представлены спектры ФЛ с различных позиций на образце с пятном лазерного возбуждения ($\lambda=532\text{nm}$) диаметром $\sim 2\text{мкм}$. Показан характерный спектр монослоя MoSe_2 , в котором наблюдаются узкие линии экситона (X) и триона (X^-), характерный спектр гетеробислоя $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$, в котором линии X и X^- расщеплены на дублеты, и линия межслоевого экситона тоже представляет собой дублет (IX_1 и IX_2). Также представлен спектр с границы монослой - гетеробислоя, в котором линии X и X^- заметно уширены и подавлены, в то время как линия межслоевого экситона остается сильной и широкой ($\sim 45\text{мэВ}$), а доминирующая в спектре узкая ($\sim 3\text{мэВ}$) линия, примерно на 100 мэВ ниже основного экситона X, относится к линии латерального интерфейсного (X_{LI}) или «краевого» экситона с диполем в плоскости [2]. Данная линия краевого экситона подавляется в спектре при уже при $T\sim 50\text{K}$, что объясняется относительно малой энергией связи X_{LI} по сравнению с линией межслоевого экситона IX, которая наблюдается в спектре даже при $T\sim 150\text{K}$.

Литература

- [1] P. Rivera, J. R. Schaibley, A. M. Jones, et.al. Nature Communications v. 6, 6242 (2015).
- [2] R. Rosati, I. Paradisanos, L.Huang et.al. Nature Communications v. 14, 2438 (2023).

Нейтральные и заряженные экситоны в монослоях WSe_2 с управляемой плотностью зарядов

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, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

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

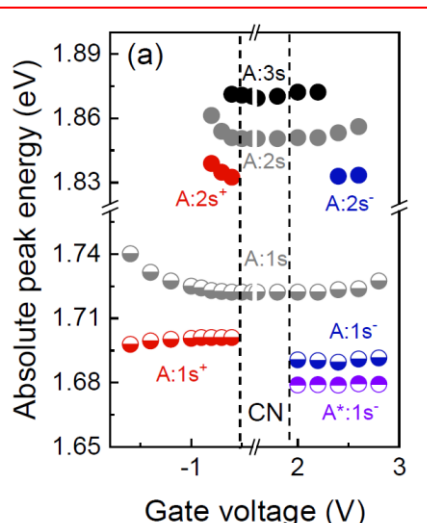


Рис.1 Энергии пиков основного и первых двух возбужденных состояний А-экситонов в зависимости от напряжения на затворе.

Монослои дихалькогенидов переходных металлов являются прямозонными полупроводниками с сильным кулоновским взаимодействием, в которых формируются экситоны с большими энергиями связи [1]. Возможность электростатически управлять плотностью носителей делает такие гетероструктуры удобной платформой для исследования эффектов взаимодействия экситонной системы со свободными носителями заряда.

В работе исследована гетероструктура с монослоем WSe_2 , инкапсулированным в гексагональный нитрид бора (hBN) на подложке SiO_2/Si , с возможностью управления плотностью носителей в монослое. Спектры микроотражения измерялись в оптическом гелиевом криостате при температуре 10 К.

В спектрах отражения были обнаружены основное состояние А-экситона $1s$ и его возбужденные $2s$, $3s$ состояния. При изменении напряжения на затворе и перехода избыточной положительной плотности носителей заряда в монослое к отрицательной, появляются дополнительные резонансы, соответствующие положительно и отрицательно

заряженным экситонам: $A:1s^+$, $A:1s^-$, $A:2s^+$ и $A:2s^-$ (Рис.1). Для состояния $A:1s^-$ наблюдается тонкая структура в виде дублета, связанная со спин-орбитальным расщеплением, в то время как для состояния $A:1s^+$ она не наблюдается.

Полученные экспериментальные данные проанализированы в рамках теоретической модели, описывающей взаимодействие экситонов со свободными носителями и учитывающей эффекты автоионизации для возбужденных состояний [2]. Наблюдаемое уменьшение энергии связи для возбужденных трионов ($2s^\pm$) по сравнению с основным состоянием ($1s^\pm$) согласуется с предсказаниями данной модели.

Литература

[1] Дурнев М. В. [и др.]. Экситоны и трионы в двумерных полупроводниках на основе дихалькогенидов переходных металлов // УФН. 2018. Т. 188. № 9. С. 372–378.

[2] K. Wagner [et al.] Autoionization and Dressing of Excited Excitons by Free Carriers in Monolayer WSe_2 // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125(26): 267401.

Управление спектральным откликом терагерцового ПИН-модулятора за счет нарушения симметрии метаповерхности

А.А. Титенко^{1*} В. М. Муравьев^{1,2}

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

²ФГУП «ВНИИФТРИ», 141570, Московская обл., г. Солнечногорск, р.п. Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корп. 11

*e-mail: toliatitenko@gmail.com

В работе исследуется влияние взаимного сдвига металлических контактных решеток, расположенных на противоположных сторонах кремниевой подложки, на спектральные характеристики терагерцового ПИН-модулятора. Структура представляет собой периодическую систему щелей шириной 100 мкм с периодом 1.2 мм, сформированную на кремниевой подложке толщиной 0.2 мм, легированной с двух сторон с образованием р–i–п структуры. Металлические решетки выполняют роль контактов и одновременно формируют резонансную метаповерхность. Падающая терагерцовая волна индуцирует токи в металлических элементах и приводит к возникновению продольных мод, локализованных в кремниевой подложке между полосками решетки, интерференция которых формирует стоячие волны. Модуляция реализуется за счет изменения проводимости i-области ПИН-структуры, что приводит к изменению поглощения излучения.

На рис. 1 представлены спектры пропускания структуры при различных значениях сдвига Δ . В симметричном случае ($\Delta = 0$ мкм) наблюдается регулярный набор резонансных пиков (рис. 1 а). При $\Delta = 200$ мкм происходит смещение резонансных частот и расщепление отдельных пиков на две компоненты, расположенные по обе стороны от исходной частоты (рис. 1 б). При $\Delta = 400$ мкм расщепление становится более выраженным (рис. 1 в), что обусловлено взаимодействием мод, возбуждаемых верхней и нижней решетками.

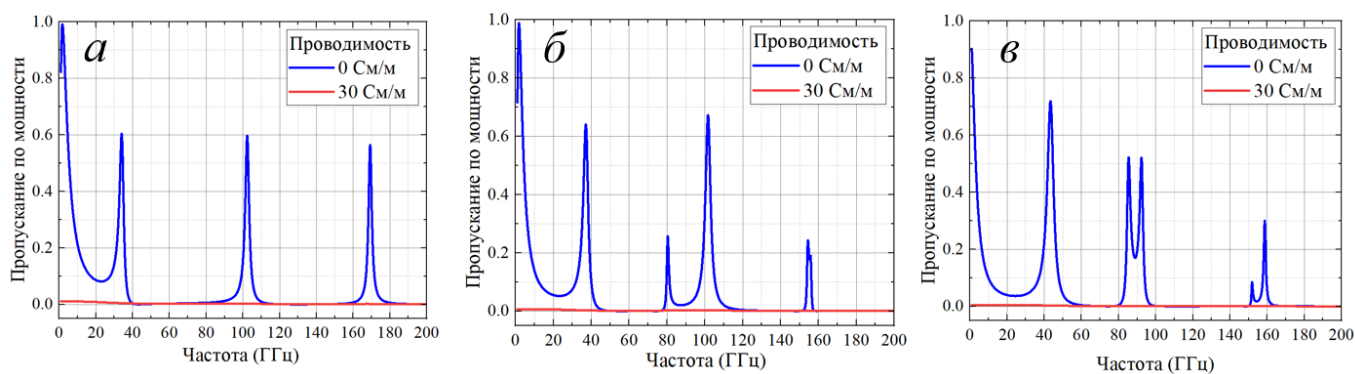


Рис. 1. Спектры пропускания структуры при различных значениях взаимного сдвига металлических контактных решеток: (а) $\Delta = 0$ мкм, (б) $\Delta = 200$ мкм, (в) $\Delta = 400$ мкм.

Показано, что нарушение симметрии метаповерхности приводит к расщеплению резонансных пиков и появлению нескольких частот с высокой глубиной модуляции (~30 дБ). Таким образом, взаимный сдвиг решеток позволяет эффективно управлять спектральным откликом и реализовать многополосную модуляцию терагерцового излучения.

О спиновом резонансе двумерной электронной системы вне состояния квантового эффекта Холла

**Г.А. Николаев,^{1,2*} А.В. Щепетильников,¹ М.Э. Сергеев,^{1,2} С.А. Андреева,^{3,1}
О.В. Орлов,^{1,2} 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 работе исследован электронный спиновый резонанс (ЭПР) в двумерной электронной системе гетероперехода ZnO/MgZnO в параллельном магнитном поле. В отличие от режима квантового эффекта Холла, где регистрация ЭПР в сопротивлении обусловлена нагревным механизмом [1], в данном случае сигнал ЭПР наблюдается даже при отсутствии температурной чувствительности сопротивления. Показано, что ЭПР сохраняется вблизи магнитного поля B^* (Рис. 1), где температурные эффекты подавлены. Это указывает на иной механизм формирования резонансного отклика. Анализ температурной зависимости амплитуды ЭПР

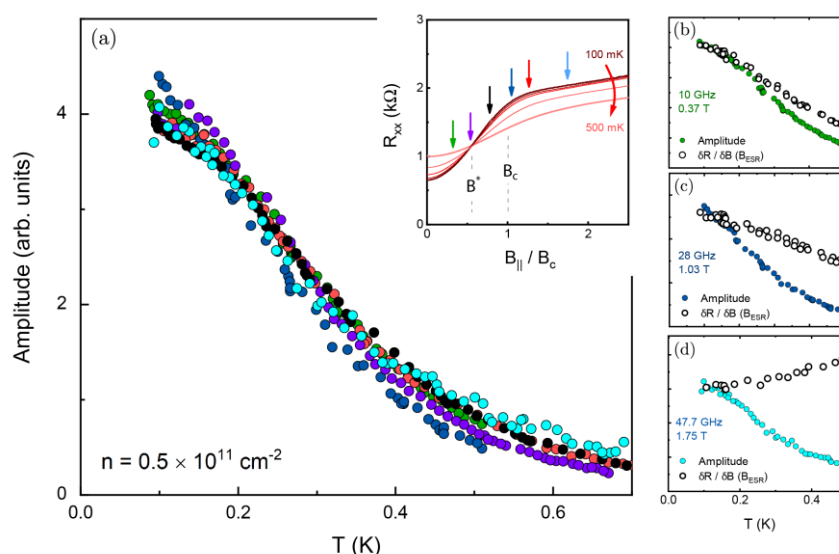


Рис.1. (a) Зависимость амплитуды ЭПР от температуры для разных значений магнитного поля. (b), (c), (d) Зависимость Амплитуды ЭПР и величины производной dR/dB (BESR) для частот (b) 10 ГГц, (c) 28 ГГц, (d) 47.7 ГГц. В малых магнитных полях в одночастичном приближении $dR/dB \sim dR/dS$.

показал, что сигнал определяется производной сопротивления по спиновой поляризации dR/dS , где S — степень спиновой поляризации. При этом функция dR/dS оказывается универсальной, то есть не зависит от величины магнитного поля и величины степени спиновой поляризации.

Литература

[1] E. Olshanetsky, J. D. Caldwell, M. Pilla, S. C. Liu, C. R. Bowers, J. A. Simmons, J. L. Reno Physical Review B, 67, 165325 (2003).

Изменение g-фактора постоянным током в двумерных электронных системах

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

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

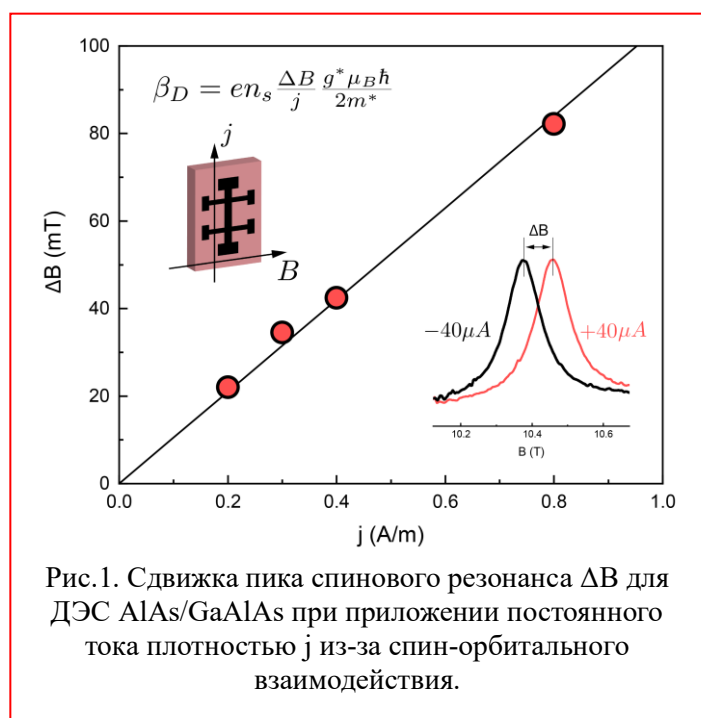
²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), 141701, Долгопрудный, Институтский пер., 9

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 10100, Москва, ул. Мясницкая, 20

*e-mail: nikolaevgk@gmail.com

В работе исследуется электронный спиновый резонанс в сильно коррелированной двумерной электронной системе (ДЭС) гетероструктур ZnO/MgZnO и AlAs/GaAlAs. Был успешно адаптирован метод из [1]: в ДЭС со спин-орбитальным взаимодействием Бычкова-

Рашбы (в ZnO/MgZnO) или Дрессельхауза (AlAs/GaAlAs) g-фактор изменяется с изменением плотности постоянного тока (рис. 1). Эффект наблюдался по изменению положения пика спинового резонанса, детектируемого в сопротивлении структуры. Ток подавался так, чтобы эффективное магнитное поле ΔB было параллельно внешнему магнитному полю B . В противном случае положение линии EPR не будет значительно изменяться с плотностью тока. Результаты измерений для ДЭС AlAs/GaAlAs с концентрацией $2.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ представлены на Рис. 1. Полученное значение константы $\beta_D = 9 \text{ meV} \times A$ совпадает со значениями, полученными в других работах.



Эксперимент проводился в криостате He^3 при температуре 0,5 K с возможностью изменения магнитного поля до 15 T. Образцы были произведены в геометрии мостика Холла. Для возбуждения электронного спинового резонанса использовалось электромагнитное излучение с частотой от 1 до 40 ГГц. Оно генерировалось микроволновым генератором и подавалось на образец через коаксиальный кабель. ЭПР регистрировался в сигнале сопротивления с помощью синхронного усилителя.

Литература

[1] Z. Wilamowski, H. Malissa, F. Schäffler, W. Jantsch, Physical Review Letters, 98, 187203 (2007).

Новые спиновые моды ДЭС гетероперехода ZnO/MgZnO

**Г.А. Николаев,^{1,2*} А.В. Щепетильников,¹ М.Э. Сергеев,^{1,2} С.А. Андреева,^{3,1}
О.В. Орлов,^{1,2} 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 работе исследованы дисперсии резонансных мод в двумерной сильно коррелированной электронной системе гетероперехода ZnO/MgZnO. Помимо стандартного электронного спинового резонанса (ЭПР, ESR на Рис. 1 (а)), наблюдается набор дополнительных резонансных линий ($A_{\pm 1}$, $A_{\pm 2}$, $B_{2,4}$). Серия А представляет собой набор мод с наклоном,

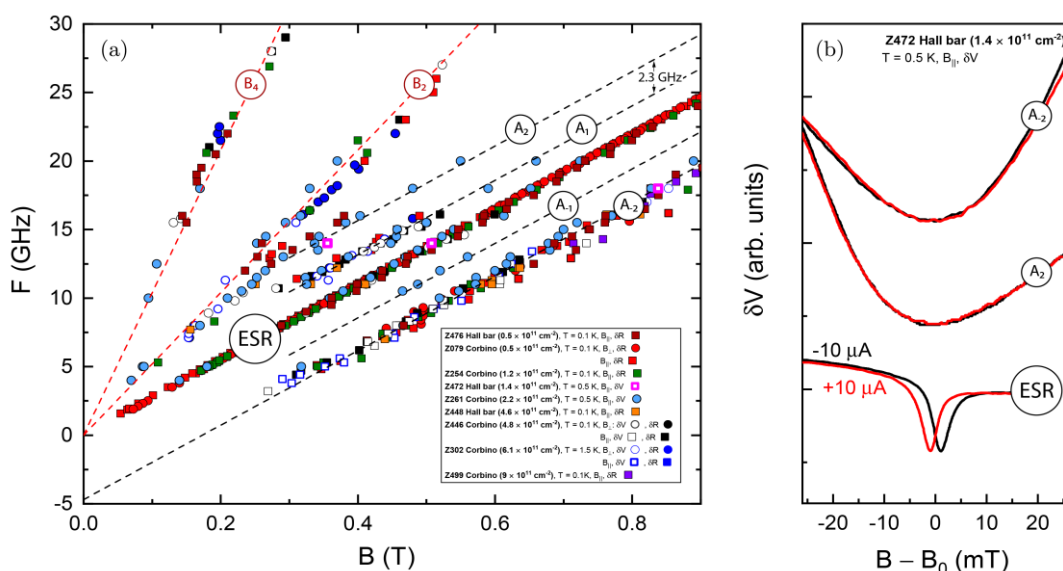


Рис.1. (а) Дисперсия электронного спинового резонанса (ESR) и новых резонансных мод (A_{-2} , A_{-1} , A_1 , A_2 , B_2 , B_4). (б) Зависимость положение пика спинового резонанса и пиков A_{-2} и A_2 от направления постоянного тока.

совпадающим с наклоном ЭПР (27.3 GHz/T), но с регулярным частотным сдвигом $\sim 2.3 \cdot i$ ГГц ($i = \pm 1, \pm 2$). Серии В демонстрируют увеличенные наклоны, приблизительно в 2 и 4 раза превышающие наклон ESR. Совпадение наклонов и поляризационных зависимостей указывает на спиновую природу мод серии А. Показано, что резонансы серии А не зависят от величины и направления постоянного тока (Рис. 1 (б)), что указывает на то, что моды не вызваны спиновым резонансом электронов на уровне Ферми [1]. Наиболее интенсивная мода A_{-2} ярко выражена в магнетосопротивлении и устойчивее к нагреву по сравнению с ЭПР, что может быть перспективно для применения в СВЧ-устройствах.

Литература

[1] Z. Wilamowski, H. Malissa, F. Schäffler, W. Jantsch, Physical Review Letters, 98, 187203 (2007).

Когерентный межслоевой транспорт близко лежащих тонких плёнок нитрида ниобия

Г.А. Николаев,^{1,2*} А.В. Щепетильников,¹ В.В. Соловьёв,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

*e-mail: nikolaevgk@gmail.com

В работе исследован когерентный транспорт сверхпроводящей структуры на основе тонких пленок нитрида ниобия, разделённых диэлектрическим слоем оксида алюминия толщиной 5 нм. Малое расстояние между слоями приводит к существенному взаимному влиянию их электрических свойств. Показано, что переход одной из пленок NbN (толщиной

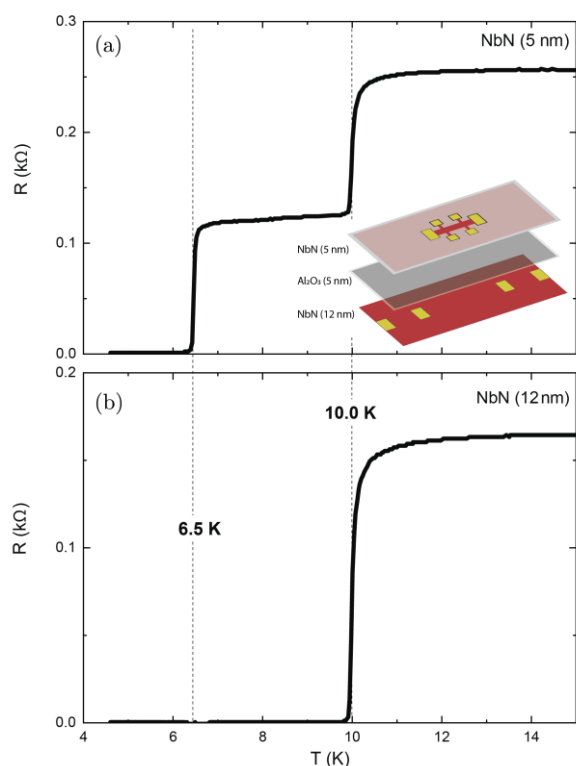


Рис.1. Температурная зависимость сопротивления в пленке NbN толщиной (a) 5 нм и (b) 12 нм.

12 нм) в сверхпроводящее состояние сопровождается уменьшением сопротивления второй пленки (5 нм) более чем в два раза. Длина когерентности в NbN сопоставима с толщиной диэлектрического слоя [1], что создаёт условия для реализации когерентного межслоевого транспорта. В исследуемой структуре изучен эффект Джозефсона. Обнаружено, что критический ток зависит от точки приложения тока, что, видимо, свидетельствует о пространственной неоднородности барьерного слоя Al_2O_3 . Несмотря на наличие джозефсоновской связи, ступеньки Шапиро не наблюдаются, видимо, также из-за неоднородности изоляционного слоя и большой площади джозефсоновского перехода.

Эксперименты проводились в криостате гелия-4 при температуре 1.5 К. Для поиска ступенек Шапиро использовалось СВЧ-излучение в диапазоне 10–100 ГГц, подводимое к образцу через волноводы и коаксиальные кабели. Для измерений на пленке NbN толщиной 5 нм сформирован холловский мостик.

Литература

- [1] S. A. Andreeva, K. R. Dzhikirba, M. V. Shibalov, A. M. Mumlyakov, I. V. Trofimov, A. V. Shchepetilnikov, O. V. Orlov, V. V. Solovyev, V. M. Kovalev, A. V. Chaplik, M. A. Tarkhov, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B, B 113, L100503 (2026).

Простой способ определения концентрации сверхпроводящих электронов в плёнке

И. В. Андреев,¹ С. А. Андреева,^{1,2*} И. В. Кукушкин¹

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*

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

При экспериментальной работе в области физики конденсированного состояния периодически возникает задача определения концентрации сверхпроводящих электронов в плёнке сверхпроводника. Для этого обычно приходится реализовывать различные схемы измерения кинетической индуктивности, что требует методик литографии и травления для изготовления экспериментальных образцов. В данной работе представлен альтернативный подход к экспериментальному определению двумерной концентрации сверхпроводящих носителей в плёнке на диэлектрической подложке. Предлагаемый подход не требует предварительного изготовления образца при помощи литографических техник, и использует только криостаты, перестраиваемые источники и широкополосные детекторы субтерагерцового диапазона частот.

Суть подхода к определению двумерной концентрации сверхпроводящих носителей в плёнке заключается в спектроскопии пропускания образца с плёнкой на диэлектрической подложке, при этом экспериментальный образец размещается при температуре ниже критической в криостате с радиопрозрачными окнами. Спектр пропускания такого образца состоит из серии резонансов Фабри-Перо. Электродинамические свойства тонкой пленки в такой задаче можно описывать чисто мнимой проводимостью, которая определяется кинетической индуктивностью сверхпроводящих электронов. Присутствие сверхпроводящей плёнки на одной из границ подложки приводит как к смещению максимумов пропускания Фабри-Перо [1], так и к уменьшению их амплитуды, причём эти эффекты выражены тем сильнее, чем меньше номер резонанса. Для типичных диэлектрических подложек (сапфир, высокорезистивный кремний и т. п. материалы) с толщиной около 500 мкм период гребенки резонансов Фабри-Перо составляет порядка 100 ГГц, т. е. измерения удобно проводить в субтерагерцовом диапазоне частот.

В работе предложена простая формула, связывающая амплитуды максимумов пропускания Фабри-Перо в образце с двумерной концентрацией сверхпроводящих электронов. Обсуждается её применение к конкретным экспериментам, а также сравнение с общепринятым подходом из работы [2], который представляет большую вычислительную сложность.

Литература

- [1] P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. B 102, 121404(R) (2020).
- [2] W. Zimmermann, E.H. Brandt, M. Bauer, E. Seider, L. Genzel, Physica C: Superconductivity (1991).

Рамановская спектроскопия хиральных гравитонов и магниторотонов в лафлиновской жидкости

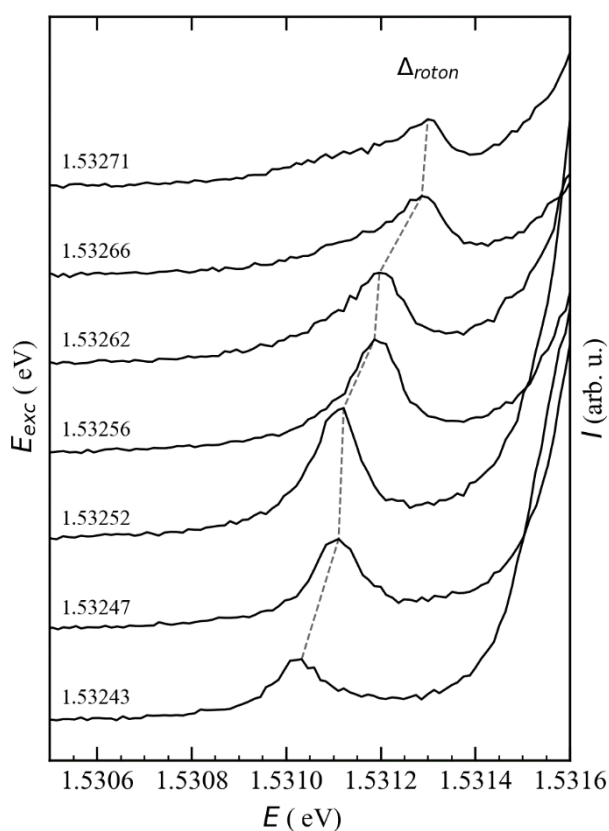
Д.А. Шигарев,^{1,2,3*} А.В. Ларионов,¹ Л.В. Кулик¹

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

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

³Сколковский институт науки и технологий, 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1

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



Рамановская спектроскопия (SRS) является мощным методом исследования энергетического спектра нейтральных возбуждений в квантовых несжимаемых жидкостях [1]. В данной работе представлены результаты исследования возбуждений зарядовой и спин-зарядовой плотности в лафлиновской жидкости на факторе заполнения $\nu = 1/3$. Эксперименты проводились на GaAs/AlGaAs квантовой яме шириной 19 нм с использованием методики скрещенных поляризаторов, что позволило подавить паразитное рассеяние и выделить линии хиральных гравитонов и магниторотонов.

Установлено, что энергии наблюдаемых мод (хирального гравитона и магниторотона) находятся в хорошем согласии с теоретическими расчетами методом точной диагонализации [2]. В наклонном магнитном поле идентифицированы спиновые компаньоны этих возбуждений: спин-хиральный гравитон и спин-магниторотон,

энергии которых зависят от зеемановского расщепления.

Литература

- [1] J. Liang, Z. Liu, Z. Yang et al., Evidence for chiral graviton modes in fractional quantum Hall liquids, Nature 628, 78 (2024).
- [2] O. Grigorev, L. Musina, A. Van'kov, O. Volkov, and L. Kulik, Birotons and “dark” quantum Hall hierarchies, Appl. Sci. 12, 7940 (2022).

Обменное смещение в гетероструктурах Fe/NiO/Pt

**А.И. Дмитриев,^{1*} Д.С. Гусев,² Л.С. Паршина,² М.С. Шанин,^{2,3}
О.А. Новодворский,² А.П. Шкуринов^{2,3}**

¹ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Московская обл., Черноголовка, пр. Академика Семенова, д.1

²НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1

³МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1

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

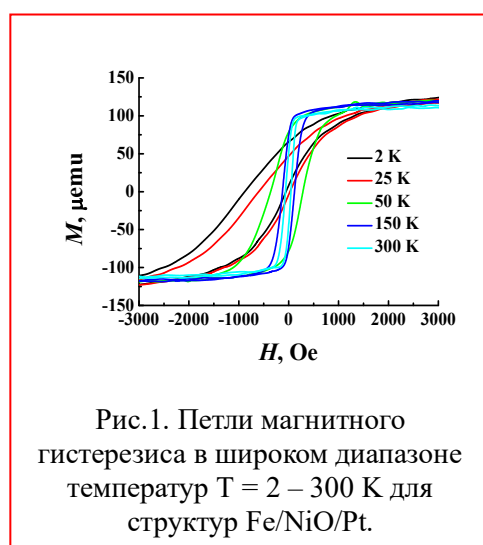


Рис.1. Петли магнитного гистерезиса в широком диапазоне температур $T = 2 - 300$ К для структур Fe/NiO/Pt.

Проведено комплексное исследование магнитных свойств тонкопленочных гетероструктур Fe/NiO/Pt [1], выращенных методом импульсного лазерного осаждения в отсутствие и в присутствии внешнего магнитного поля. В работе экспериментально обнаружено и всесторонне охарактеризовано явление обменного смещения $H_{\text{ЕВ}}$, достигающее величин до -470 Ое при 2 К. Установлено, что рост структур в магнитном поле приводит к значительному увеличению $H_{\text{ЕВ}}$, коэрцитивной силы $H_{\text{С}}$ и квадратности петли гистерезиса $S \approx 0.97$. Температурные зависимости $H_{\text{ЕВ}}(T)$ и $H_{\text{С}}(T)$ успешно описаны в рамках модели случайного поля Малоземова и экспоненциальной модели, учитывающей вклад неоднородностей. Методом приближения к насыщению определены константа магнитной анизотропии $K \sim 10^6$ эрг/см³ и ее

температурная зависимость, а также зависимость намагниченности насыщения M_{S} от температуры, соответствующая закону Блоха с показателем степени, характерным для низкоразмерных систем. Показано, что наложение магнитного поля во время роста является эффективным инструментом управления магнитной архитектурой на атомарном уровне для создания перспективных материалов спинтроники.

В части синтеза тонких пленок работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». В части исследования магнитных свойств – в рамках государственного задания ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН (124013100858-3). А.И. Дмитриев благодарен своей дочери М.А. Дмитриевой (2008-2025) – источнику тихой стойкости и напоминания о том, что истина требует мужества за незримое вдохновение, сопровождавшее эту работу.

Литература

[1] Д.С. Гусев, А.И. Дмитриев, Л.С. Паршина, М.С. Дмитриева, М.С. Шанин, А.С. Синько, Р.И. Воронин, О.А. Новодворский, А.П. Шкуринов, Известия вузов. Радиофизика LXVIII, 1017 (2025).

Зависимость температуры Нееля от концентрации кальция в $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\delta}$

А.И. Дмитриев,^{1*} О.Г. Рыбченко,² В.Д. Седых²

¹ФИЦ ПХФ и МХ РАН, 142432, Московская обл., Черноголовка, пр. Академика Семенова, д.1

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

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

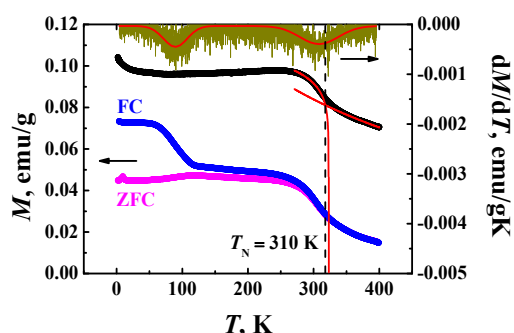


Рис.1. Температурные зависимости намагниченности $M(T)$ образца $\text{La}_{0.3}\text{Ca}_{0.7}\text{FeO}_{3-\delta}$. Черная кривая – стандартная зависимость $M(T)$, измеренная в режиме охлаждения в магнитном поле напряженностью 5 кОе, синяя линия (FC) – кривая, измеренная в поле 1 кОе после предварительного охлаждения образца в поле 10 кОе, сиреневая линия (ZFC) – кривая измеренная в поле 1 кОе после предварительного охлаждения образца в нулевом поле. Желтая кривая – производная $dM(T)/dT$. Красными линиями показаны аппроксимации. Вертикальной пунктирной линией отмечена температура Нееля T_N .

Показано, что во всех образцах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\delta}$, $x = 0 - 1$, доминирует антиферромагнитный суперобмен (отрицательная константа Вейса). Появление ионов Fe^{4+} при замещении La^{3+} на Ca^{2+} [1] приводит к ослаблению антиферромагнитного суперобмена и возникновению конкурирующего ферромагнитного двойного обмена, что вызывает фрустрацию магнитной подрешетки, разбиение на наноразмерные кластеры и расхождение кривых FC/ZFC (рис.1). Впервые для широкого интервала $x = 0 - 1$ установлена немонотонная зависимость температуры Нееля $T_N(x)$ с минимумом при $x = 0.5$ ($T_N = 280$ K). Резкое падение температуры Нееля при $0 < x < 0.5$ от значения $T_N = 740$ K в фазе LaFeO_3 ($x = 0$) с сильным суперобменом $\text{Fe}^{3+}\text{--O}^{2-}\text{--Fe}^{3+}$ объясняется усилением фрустрации из-за роста числа ослабленных обменных связей $\text{Fe}^{3+}\text{--O}^{2-}\text{--Fe}^{4+}$ и $\text{Fe}^{4+}\text{--O}^{2-}\text{--Fe}^{4+}$, а также образованием кислородных вакансий. Рост T_N при $0.5 < x < 1$ связан с уменьшением концентрации Fe^{4+} , упорядочением кислородных вакансий и восстановлением сильного суперобмена $\text{Fe}^{3+}\text{--O}^{2-}\text{--Fe}^{3+}$ в фазе $\text{CaFeO}_{2.5}$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственных заданий ФИЦ ПХФ и

МХ РАН (124013100858-3) и ИФТТ им. Ю.А. Осипьяна РАН (075-00370-24-04). А.И. Дмитриев благодарен своей дочери М.А. Дмитриевой (2008-2025 гг.) – его небесному соавтору, чьи ценности навсегда останутся с ним.

Литература

[1] В.Д. Седых, В.С. Русаков, О.Г. Рыбченко, А.М. Гапочка, М.Е. Мацнев, А.А. Топоркова, А.И. Иванов, В.И. Кулаков, ФТТ 67, 1765 (2025).

Обратимость структурных переходов в ортоферрите $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ при термообработке

В.Д. Седых,^{1*} А.А. Топоркова,¹ О.Г. Рыбченко,¹ В.С. Русаков,² А.И. Иванов,¹ В.И. Кулаков¹

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

²МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1

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

Проведены исследования структурных изменений, локальных состояний атомов Fe и кислородных вакансий в феррите $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ в зависимости от типа отжига (в вакууме и на воздухе) при 650°C с использованием методов рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии.

Поликристаллический образец синтезирован на воздухе золь-гель методом при температуре 1200°C. Далее проводился отжиг образца при 650°C в вакууме (10^{-3} Torr) в течение 4-х часов. Согласно рентгеновским данным синтезированный образец представляет собой смесь двух фаз, основной ромбической *Pnma* и небольшого количества фазы Гренье.

В ходе вакуумного отжига в образце происходит сложный процесс структурной перестройки, заключающийся в значительных изменениях фазового состава образца. После вакуумного отжига образец также представляет собой смесь двух фаз, только кубической и небольшого количества фазы Гренье. Далее этот образец повторно отжигался при 650°C на воздухе в течение 6 часов. Из рентгеновских данных следует обратимость структурного перехода в исходное состояние.

Мессбауэровские измерения при комнатной температуре синтезированного и отожженных в вакууме и на воздухе при 650°C образцов подтвердили рентгеновские данные по обратимости процессов, происходящих при термической обработке (рис. 1). Из анализа данных следует, что мессбауэровские спектры исходного и отожженного на воздухе образцов состоят из трех вкладов: парамагнитного типа в виде квадрупольного дублета, магнитно-упорядоченного вклада, состоящего из двух слабоинтенсивных зеемановских секстетов и магнитно-расщепленного уширенного парциального спектра. Наличие первого вклада свидетельствует о большом количестве ионов Fe^{4+} . Второй вклад связан с формированием фазы Гренье. Парциальный спектр третьего вклада свидетельствует о неоднородном распределении ионов Fe^{4+} и кислородных вакансий в этих образцах. Анализ спектра образца, отожженного в вакууме, показывает, что с уходом варьированного кислорода ионы Fe^{4+} переходят в Fe^{3+} , которые находятся в двух кислородных окружениях: октаэдрическом и тетраэдрическом.

Полученные результаты по обратимости процессов могут быть полезны в различных прикладных областях.

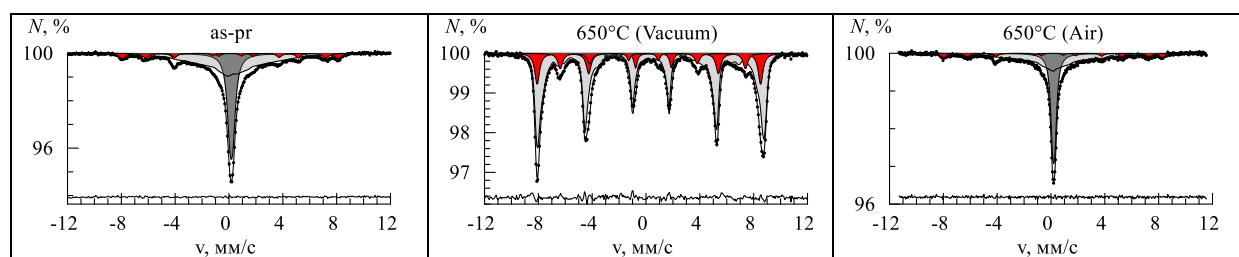


Рис 1. Мессбауэровские спектры и их обработка образцов феррита $\text{La}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$: исходного (as-pr), отожженных при 650°C в вакууме, а затем на воздухе.

Влияние неидеальности квантового неразрушающего измерения на безопасность протокола BB84 с состояниями ловушками при учете временного побочного канала

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

В практических системах квантового распределения ключей широко распространен протокол BB84 с состояниями-ловушками, однако его информационная безопасность ограничена техническими несовершенствами оптоэлектронных компонентов. Проблема заключается в том, что реальные устройства (источники, детекторы, электроника) неидеальны, например, время излучения импульса или момент срабатывания детектора могут зависеть от кодируемого состояния (интенсивности или поляризации сигнала). Эту зависимость способен обнаружить и проанализировать злоумышленник, не вмешиваясь в кодирующую степень свободы и не вызывая дополнительных ошибок, которые могли бы выдать его присутствие. Таким образом, через побочный канал информация о ключе утекает скрыто, что делает стандартные процедуры оценки безопасности недостаточными.

Актуальность данной проблемы обусловлена тем, что большинство стандартных моделей безопасности, включая модель с состояниями-ловушками, либо игнорируют временные побочные каналы, связанные с источником света, либо рассматривают их лишь в идеализированном приближении, что может приводить к неоправданно оптимистичным оценкам секретности ключа.

В настоящей работе в рамках модели GLLP [1] мы вводим в рассмотрение атаку, осуществляемую с помощью квантового неразрушающего измерения, позволяющую злоумышленнику измерять временной побочный канал источника света без поглощения фотонов. Также в модели мы учитываем диссипации в канале связи и то, как они влияют на различимость передаваемых групп квантовых состояний (сигнальные состояния и состояния-ловушки) при применении данной методики, поскольку именно различимость определяет, насколько точно легитимные пользователи могут использовать методику состояний-ловушек для обнаружения атаки с разделением сигнала по числу фотонов.

Литература

- [1] D. Gottesman, H. K. Lo, N. Lütkenhaus, J. Preskill, "Security of quantum key distribution with imperfect devices," *Quantum Information & Computation*, 2004
- [2] C. W. Gardiner, "Input and output in damped quantum systems III: formulation of damped systems driven by Fermion fields," *Optics Communications*, vol. 243, pp. 57-80, 2004.
- [3] H. Dong, Z. R. Gong, H. Ian, Lan Zhou, and C. P. Sun, "Intrinsic cavity QED and emergent quasinormal modes for a single photon," *Physical Review A*, vol. 79, pp. 063847, 2009.

Кинетика фазового перехода $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ в кубическую структуру

С.В.Зайцев,* О.Г. Рыбченко, К.П. Мелетов

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

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

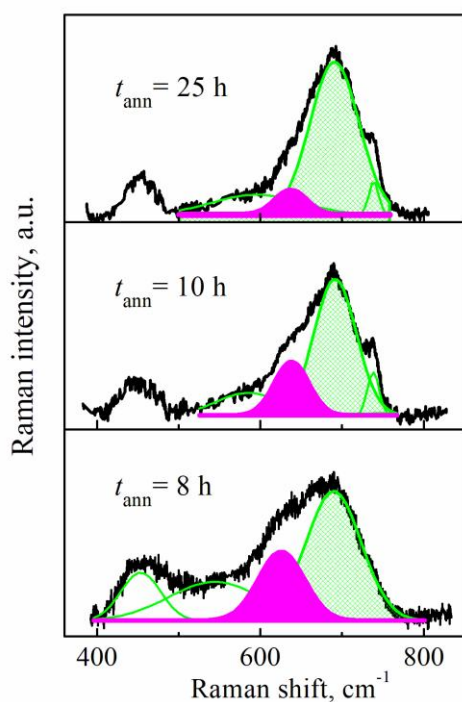


Рис.1. Спектры КРС в образце $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$ для разного времени t_{ann} вакуумного отжига при 650°C .

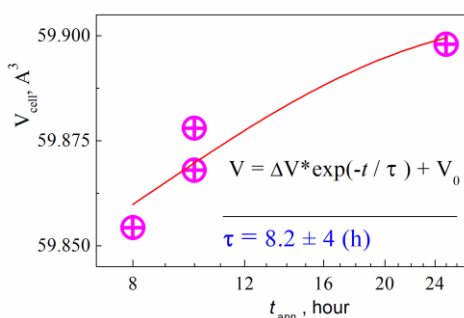


Рис.2. Зависимость среднего объема кубической перовскитной ячейки V_{cell} от времени отжига.

Методами комбинационного рас-сеяния света (КРС) и рентгенофазного анализа (РФА) исследована кинетика перехода в кубическую фазу в зависимости от длительности вакуумного отжига t_{ann} при температуре 650°C для поликристаллических образцов замещенного ортоферрита лантана $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\gamma}$, полученных золь-гель методом на воздухе при 1300°C [1].

Отжиг исходного ортоферрита с ромбоэдрической структурой ($R\bar{3}c$) приводит к появлению в образце двух кубических фаз ($Pm\bar{3}m$) с близкими, но отличающимися на две единицы в третьем знаке параметрами решетки. Поскольку параметр ячейки напрямую зависит от содержания кислорода, то возможное объяснение этому факту связано с наличием в образце крупных зерен и заметным разбросом их по размерам, от чего зависят пути диффузии и время выхода кислорода из зерна в ходе вакуумного отжига [1]. В спектрах КРС наиболее сильная фоновая мода при частоте $\sim 630\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (отвечает синфазным колебаниям октаэдра FeO_6) аномально уширена и имеет структуру дублета (подгонка гауссианами приведена на рис.1). Выделенная зеленой линией полоса $\sim 690\text{ cm}^{-1}$ относится к основной по объёму кубической фазе, розовым цветом выделена полоса $\sim 630\text{ cm}^{-1}$, отвечающая второй из них. С ростом t_{ann} доля низкоэнергетичной моды монотонно падает и после 25 ч отжига её менее 10%. По данным РФА, с увеличением времени вакуумного отжига растет объем кубической перовскитной ячейки V_{cell} (рис.2). Из зависимости $V_{\text{cell}}(t_{\text{ann}})$ получена оценка $\tau \approx 8\text{ ч}$ для характерного времени перехода между кубическими фазами при отжиге.

Литература

[1] В.Д. Седых, О.Г. Рыбченко, В.С. Русаков, А.М. Гапочка, А.И. Дмитриев, Е.А. Першина, С.В. Зайцев,

К.П. Мелетов, В.И. Кулаков, А.И. Иванов, ФТТ **67**, 206 (2025).

Колебательные моды в фазах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\gamma}$ с двумя кислородными окружениями ионов Fe^{3+}

С.В.Зайцев*, Т.Н. Фурсова, О.Г. Рыбченко, В.Д. Седых

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

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

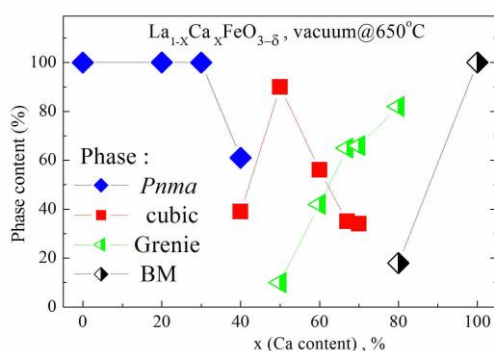


Рис.1. Фазовый состав от содержания Са в образцах $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\gamma}$.

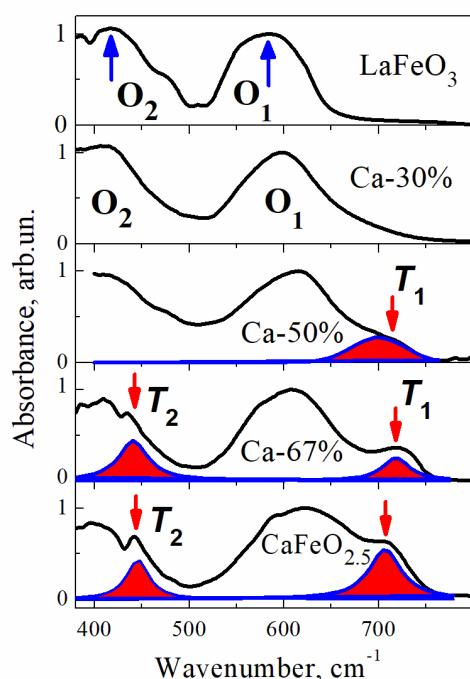


Рис.2. Спектры поглощения при $T = 300$ К образцов $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\gamma}$.

Методами инфракрасной фурье-спектроскопии (ИК ФС), комбинационного рассеяния света (КРС) и рентгенофазного анализа (РФА) исследованы поликристаллические образцы замещенного ортоферрита лантана $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_{3-\gamma}$, синтезированные золь-гель методом при 1200°C [1]. После вакуумного отжига при 650°C образуются кислородные вакансии, а все ионы железа полностью переходят в состояние Fe^{3+} .

Образцы с $x < 0.4$ имеют ромбическую структуру (пр. гр. *Pnma*). С ростом содержания Са происходит переход сначала в кубическую фазу при $x \geq 0.4$, а затем при $x \geq 0.5$ в фазу Гренье и в фазу браунмиллерита (ВМ) при $x \geq 0.8$ (рис.1). В фазах Гренье и ВМ, кроме октаэдров FeO_6 , в кристаллической структуре формируются также тетраэдры FeO_4 [1].

В ромбической фазах наблюдаются две группы мод колебаний (рис.2): группа O_1 при ~ 500 – 650 cm^{-1} отвечает валентным колебаниям октаэдра и группа O_2 при ~ 300 – 500 cm^{-1} , отвечающая деформационным колебаниям октаэдра FeO_6 [2]. В образцах, имеющих тетраэдры FeO_4 как структурные элементы, появляются дополнительные моды колебаний: мода T_1 при ~ 730 cm^{-1} и мода T_2 при ~ 440 cm^{-1} (рис.2), по-видимому, отвечающие валентным и деформационным колебаниям тетраэдра, соответственно.

Литература

- [1] В.Д. Седых, В.С. Русаков, О.Г. Рыбченко, А.М. Гапочка, М.Е. Мацнев, А.А. Топоркова, А.И. Иванов, В.И. Кулаков, ФТТ **67**, 1765 (2025).
- [2] A.I. Becerro, M.A. Carpenter, T. Boffa Ballaran and F. Seifert, Phase Transitions, **71**, 161 (2000).

Поляризация горячей люминесценции в ферромагнитных диодных структурах InGaAs/GaAs/ δ -Mn

С.В. Зайцев*

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

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

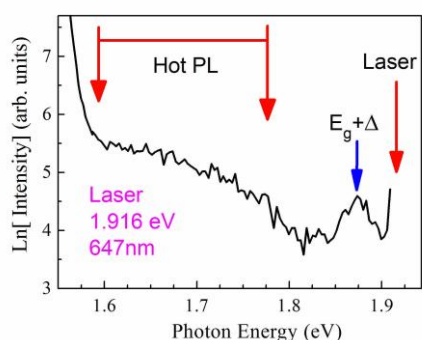


Рис.1. Спектр горячей люминесценции для перехода $e - A_{Mn}^0$ (лазер с энергией кванта ~ 1.92 эВ (647 нм)).

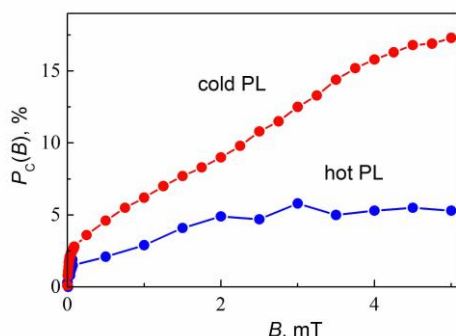


Рис.2. Зависимости $\rho_c(B)$ для рекомбинации термализованных электронов ($\hbar\omega_{PL} = 1.41$ эВ) – cold PL, и горячих ($\hbar\omega_{PL} = 1.69$ эВ) электронов (hot PL) на марганцевый акцептор $e - A_{Mn}^0$.

Исследована циркулярно-поляризованная термализованная и горячая фотолюминесценция (ФЛ) в магнитном поле $B = 0-5$ Тесла в светодиодных структурах, содержащих ультратонкий ферромагнитный (ФМ) слой марганца (δ -Mn-слой) и квантовую яму InGaAs/GaAs, разделённых спейсером GaAs $d_s = 5$ нм [1].

Спектр горячей люминесценции для перехода горячих электронов на уровень ионов Mn возле ФМ слоя δ -Mn при возбуждении лазером с энергией кванта ~ 1.92 эВ (647 нм) приведен на рис.1. На рис.2 показаны зависимости циркулярной поляризации $\rho_c(B)$, измеренные в геометрии Фарадея (по нормали к плоскости структуры) в случае рекомбинации термализованных ($\hbar\omega_{PL} = 1.41$ эВ) (красные кружки) и горячих ($\hbar\omega_{PL} = 1.69$ эВ) электронов (синие кружки) на марганцевый акцептор $e - A_{Mn}^0$.

В слабых полях (область гистерезиса) величины поляризаций сравнимы, тогда как в сильных полях (рис.2с) поляризация тепловой ФЛ гораздо больше, чем горячей. Это значит, что в области слабых полей поляризация краевой ФЛ определяется магнитными акцепторами P_A и возможно электронами, тогда как в сильном поле обусловлена в основном поляризацией термализованных электронов P_e .

Литература

[1] Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С. и др.,

Письма в ЖЭТФ **90**, 730 (2009).

[2] Korenev V.L., Akimov I.A., Zaitsev S.V. et al., Nature Comm. **3**, 959 (2012).

Кинетика стимулированной люминесценции в нанокристаллических образцах $\text{NaGdF}_4:\text{Eu}$

С.В.Зайцев,* А.П. Киселев, В.В. Кедров

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

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

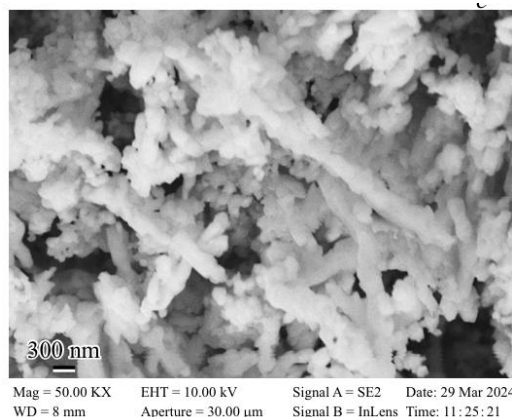


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение образца $\text{NaGd}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{F}_4$.

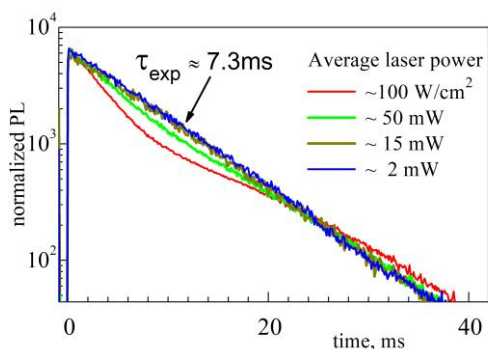


Рис.2. Кривые затухания ФЛ при $\lambda = 615$ нм образца $\text{NaGd}_{0.8}\text{Eu}_{0.2}\text{F}_4$ при $T = 300$ К.

Исследовалась кинетика стимулированной фотолюминесценции (ФЛ) ионов европия Eu^{3+} при $\lambda_{\text{ФЛ}} = 615$ нм (переход $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$) в нанопорошках гексагональной фазы $\beta\text{-NaGd}_{1-x}\text{Eu}_x\text{F}_4$ при интенсивном оптическом возбуждении и $T = 300$ К. Для нерезонансного возбуждения использовался эксимерный лазер с длиной волны $\lambda_L = 308$ нм (длительность импульса ~ 10 нс, частота импульсов 15 Гц, энергия в импульсе ~ 2 мДж). Лазер фокусировался на засыпанный в кварцевую кювету порошок в пятно диаметром ~ 100 мкм.

Полученные гидротермальным методом [1] образцы $\beta\text{-NaGdF}_4:\text{Eu}$ во всем диапазоне концентраций x ионов Eu^{3+} представляют собой агломераты из мелких нанокристаллов округлой формы диаметром $\sim 100\text{--}200$ нм. Для образцов с $0 \leq x \leq 0.3$, кроме мелких округлых микрокристаллов, наблюдаются также удлиненные микрокристаллы длиной $\sim 0.5\text{--}2$ мкм и толщиной $\sim 0.1\text{--}0.5$ мкм (рис.1).

При всех концентрациях Eu^{3+} кривые свечения хорошо описываются моноэкспоненциальным законом $I(t) \sim \exp(-t/\tau)$ [1]. Однако в образцах состава $x = 0.15\text{--}0.3$, отвечающих максимальному квантовому выходу ФЛ [1], кривая $I(t)$ существенно отклоняется от моноэкспоненциальной и имеет условную "точку перегиба" при $t \sim 3\tau$ (~ 25 мс) при средних и высоких уровнях фотовозбуждения $P_0 > 10$ Вт/см² (рис.2). Сложное и "нестандартное" [2] проявление стимулированной ФЛ объясняется, по-видимому, сложной композитной морфологией образцов,

представляющих собой агломерат округлых нанокристаллов и удлиненных микрокристаллов (рис.1).

Литература

- [1] А.П. Киселев, В.В. Кедров, С.В. Зайцев и др., ФТТ **66**, 1598 (2024).
- [2] С.В. Зайцев, Изв. РАН. Сер. физ. **86**, 543 (2022).

Аугментация рамановских спектров как способ балансировки данных при идентификации образцов сыворотки крови

И.А. Матвеева

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика
С.П. Королева, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34*

*e-mail: m-irene-a@yandex.ru

Рамановская спектроскопия является перспективным экспресс-методом анализа жидкостей и биологических сред, поскольку формирует индивидуальный «спектральный отпечаток» образца и может применяться для задач идентификации в интересах безопасности и медицинской диагностики [1]. Для практического внедрения таких систем критически важны устойчивость алгоритмов к межиндивидуальной вариабельности и корректная работа в условиях дисбаланса классов, что особенно характерно, например, для биомедицинских выборок [2]. Целью работы стало исследование влияния различных методов аугментации рамановских спектров на качество бинарной классификации при распознавании крови пациентов с хронической сердечной недостаточностью (ХСН) и здоровых добровольцев.

В работе использованы рамановские спектры сыворотки крови пациентов с ХСН и контрольной группы здоровых лиц. Для балансировки обучающей выборки были протестированы несколько подходов к генерации дополнительных спектров для класса «здоровые»: 1) линейная интерполяция между двумя спектрами с получением промежуточного спектра; 2) добавление случайного гауссовского шума с последующим сглаживанием; 3) разложение спектра на компоненты с дальнейшим внесением шума в компоненты и обратным сложением. Качество классификации оценивалось по точности, полноте, F1-мере и ROC AUC при сопоставимых условиях обучения моделей.

Наиболее стабильные результаты продемонстрировали методы, сохраняющие физически правдоподобную форму спектра и при этом расширяющие вариативность класса без разрушения информативных полос. Линейная интерполяция обеспечивает простое и быстрое увеличение выборки, но при чрезмерном использовании может приводить к сглаживанию диагностически значимых особенностей. Добавление шума с последующим сглаживанием улучшает устойчивость модели к экспериментальным флуктуациям, однако требует аккуратного выбора параметров. Наилучший баланс между разнообразием и сохранением структуры спектра показал подход на основе компонентного разложения с шумовой модификацией и обратным восстановлением.

Аугментация рамановских спектров является эффективным инструментом балансировки классов в задачах идентификации биологических жидкостей. Выбор метода генерации синтетических спектров должен учитывать не только статистическую эффективность, но и сохранение физической интерпретируемости данных.

Литература

- [1] N. Kuhar, S. Sil, T. Verma, and S. Umapathy, RSC Adv 8(46), 25888–25908 (2018).
- [2] R. Luo, J. Popp, and T. Bocklitz, Analytica 3(3), 287–301 (2022).

Оценка количества регистрируемых на SiPM-детекторе фотонов в системах безопасности на основе рамановской спектроскопии

М.Э. Парфёнов, ^{1*} Д.Н. Артемьев, ¹ Д.В. Корнилин¹

¹ Самарский университет им. Королёва, 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

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

Актуальность рассмотрения детекторов на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM) в рамановской спектроскопии обуславливается их успешным применением в лидарах, компактностью, экономической эффективностью и большим динамическим диапазоном [1]. Комбинационное рассеяние, в силу малого сечения ($\sigma \sim 10^{-30} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$) является крайне низкоинтенсивным, поэтому, применение SiPM детекторов в базовом режиме считывания сигнала, в системах со временным разрешением (с «отсечением» паразитной флуоресценции во времени) и при одиночном счёте фотонов (TCSPC) требует оценки количества фотонов, приходящих на пиксели детектора. При стандартном процессе фиксирования сигнала (например, по схеме Черни-Тёрнера) – излучение от лазера попадает на образец, рассеиваясь – поступает (с некоторым коэффициентом сбора рамановского сигнала t_{col}) через оптическое волокно и щель в монохроматор, где отражается от коллимирующего зеркала, раскладывается в спектр дифракционной решёткой и фокусируется на самом детекторе вторым зеркалом. Каждый из указанных оптических элементов вносит некоторые потери, зависящие от длины волны излучения. Детекторы состоят из пикселей, каждому из которых соответствует некий спектральный интервал – так для j -ого пикселя: $\Delta\lambda_j = [\lambda_j^-, \lambda_j^+]$. Число фотонов в секунду, приходящееся на $\Delta\lambda_j$, с учётом потерь на описанных выше элементах оптического тракта и эффективности регистрации детектора – можно получить делением спектральной плотности мощности на энергию фотонов по формуле 1:

$$N_{\gamma,j} = \int_{\lambda_j^-}^{\lambda_j^+} \frac{P(\lambda)\lambda}{hc} t_{\text{col}} T_{\text{ов}}(\lambda) T_{\text{щель}}(\lambda) \eta_{\text{реш}}(\lambda) R_1(\lambda) R_2(\lambda) QE(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Указанная формула при инженерных оценках, может быть упрощена, если принимать изменения в рамках спектрального интервала незначительными. Например, используя оценки параметров оптического тракта и уровней рамановского сигнала, приведённые в [2] для области $\lambda \sim 800$ нм можно получить, что число фотонов $N_{\gamma,j}$, регистрируемых одним пикселем детектора за секунду ($\Delta\lambda = 100$ нм и 100 пикселях), составляет $10^5 - 10^7 \text{ с}^{-1}$. Оценка показывает, что в стандартных режимах регистрации поток достаточен для измерения при интегральном накоплении. При переходе же к методам временного разрешения (TG, TCSPC) эффективное число фотонов в пределах короткого окна регистрации становится существенно меньше единицы, и сигнал определяется статистикой отдельных событий. Более полная оценка (с рассмотрением разных случаев) требует использования формулы (1) с учётом функциональной зависимости коэффициентов от длины волны и параметров системы.

Литература

- [1] Yue Ma et al., Theoretical detection model of SiPM-based photon-counting lidars and performance analysis under different discrimination thresholds, Optics Express (2025).
- [2] D.N. Artemyev, A.A. Shatskaya, Study of spurious optical signals in a fiber-optic Raman spectroscopy system, Optics & Laser Technology (2022).

Сравнение алгоритмов машинного обучения для классификации рамановских спектров химических соединений в системах безопасности

Д.С. Якименко,* М.Э. Парфенов

Самарский университет им. Королёва, 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

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

Методы управления химическими веществами имеют решающее значение для предотвращения или минимизации риска воздействия химических веществ на людей и окружающую среду, вызванного проблемами безопасности. [1]. В связи с развитием технологий рамановской спектроскопии, данную технологию возможно применять в системах безопасности. Это позволит автоматически обнаруживать принадлежность объекта к определенному классу на основании изменяемых признаков.

В данном исследовании сравнивались несколько алгоритмов машинного обучения для классификации химических соединений и были рассмотрены некоторые методы предварительной обработки спектров. Для данного исследования использовался датасет «Open-source Raman spectra of chemical compounds for active pharmaceutical ingredient development», где содержались 3510 спектров от 32 химических веществ [2]. Для сравнения алгоритмов использовались модели Linear SVM, k-NN, Random Forest и XGBoost. Linear SVM представляет собой линейный метод классификации, разделяющий классы с максимальным зазором между ними. k-NN основан на отнесении объекта к классу ближайших соседей в пространстве признаков и позволяет оценить локальную разделимость спектров. Random Forest является ансамблевым методом на основе множества деревьев решений, обеспечивающим устойчивость к шуму и возможность моделирования нелинейных зависимостей. XGBoost представляет собой метод градиентного бустинга над деревьями решений.

Для предварительной обработки спектров было использовано четыре метода: $\leq 3150 \text{ см}^{-1}$ + коррекция базовой линии + SNV; $\leq 3150 \text{ см}^{-1}$ + коррекция базовой линии + min-max; $150\text{--}1150 \text{ см}^{-1}$ + SNV; $150\text{--}1150 \text{ см}^{-1}$ + коррекция базовой линии + SNV. Результаты сравнения моделей показали, что наибольшая F1-мера принадлежит алгоритму Random Forest, а значит этот алгоритм обеспечивает наилучшее качество классификации. Наилучшим методом предобработки является выделение области отпечатков пальцев $150\text{--}1150 \text{ см}^{-1}$ и нормализация SNV, поскольку при данной обработке была достигнута наилучшая итоговая метрика.

Литература

- [1] N. F. Fouzi, H. A. Aziz, N. Yaakub Systematic review of chemical safety and chemical security risk management approach, Process Safety and Environmental Protection (2024).
- [2] A. R. Flanagan and F. G. Glavin Open-source Raman spectra of chemical compounds for active pharmaceutical ingredient development, Scientific Data 12, Galway (2025).

Особенности применения копланарного волновода для исследования сверхпроводящих плазмонов

О.В. Орлов,^{1,2*} А.В. Щепетильников,² С.А. Андреева,^{2,3} Г.А. Николаев,^{1,2} И.В. Кукушкин³

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

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

³*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 2*

*e-mail: orlov.ov@phystech.edu

Двумерные сверхпроводники представляют собой область повышенного интереса, как с практической, так и с академической точки зрения. Применения их включают в себя кубиты [1] и системы их считывания [2], а также использование в качестве детекторов и прочих компонент в системах терагерцовой оптики [3]. Фундаментальный интерес представляет множество коллективных мод, возникающие за счет сложного взаимодействия нормальных и сверхтекучих фаз в сверхпроводнике. Одной из таких мод является двумерный акустический плазмон в грязных пленках сверхпроводника [4]. Однако для его наблюдения ранее использовались методы квазиоптики, применимые выше 70 ГГц. В качестве низкочастотной методики может быть использован копланарный волновод - однако его применение сопряжено с некоторыми трудностями, что и будут описаны в данной работе.

Для исследования были использованы пленки NbN на подложках высокорезистивного кремния и сапфира, выполненные в форме дисков или полосок. Измерения проводились в области температур от 4.2 К до 70К с использованием гелиевого криостата. Для детектирования использовался диод Шоттки, генератор микроволнового излучения, векторный анализатор цепей.

В результате были выявлены и исследованы особенности подобной схемы измерения, установлены оптимальные параметры копланарного волновода и геометрии системы.

Литература

- [1] S. Kim, L. V. Abdurakhimov, D. Pham, W. Qiu, H. Terai, S. Ashhab, S. Saito, T. Yamashita, and K. Semba, Superconducting flux qubit with ferromagnetic Josephson π -junction operating at zero magnetic field, Commun. Mater. 5, 216 (2024).
- [2] T. Van Thiel, M. Weaver, F. Berto, P. Duivesteyn, M. Lemang, K. Schuurman, M. Žemlička, F. Hijazi, A. Bernasconi, C. Ferrer, et al., Optical readout of a superconducting qubit using a piezo-optomechanical transducer, Nat. Phys. 21, 401 (2025).
- [3] W. Miao, F. Li, Q. Luo, Q. Wang, J. Zhong, Z. Wang, K. Zhou, Y. Ren, W. Zhang, J. Li, S. Shi, C. Yu, Z. He, Q. Liu, and Z. Feng, A terahertz detector based on superconductor-graphene-superconductor Josephson junction, Carbon 202, 112 (2023)
- [4] S. A. Andreeva, K. R. Dzhikirba, M. V. Shibalov, A. M. Mumlyakov, I. V. Trofimov, A. V. Shchepetilnikov, O. V. Orlov, V. V. Solovyev, V. M. Kovalev, A. V. Chaplik, M. A. Tarkhov, and I. V. Kukushkin Observation of plasma excitations of superconducting electrons in NbN thin films, Physical Review B, 113(10), L100503.

Наблюдение низкочастотных плазмонов в пленках NbN в геометрии диска при помощи копланарной методики

О.В. Орлов,^{1,2*} А.В. Щепетильников,² С.А. Андреева,^{2,3} Г.А. Николаев,^{1,2} И.В. Кукушкин³

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

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

³*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, ул. Мясницкая, 2*

**e-mail: orlov.ov@phystech.edu*

Двумерные сверхпроводники вызывают значительный интерес как для приложений, так и для фундаментальных исследований коллективных мод, возникающих за счет сложного взаимодействия нормальной и сверхтекучей фаз в сверхпроводнике. В подщелевом диапазоне энергий проявляются плазменные возбуждения, мода Карлсона–Голдмана [1] и многие другие. Для грязных пленок сверхпроводника возможно наблюдение двумерных акустических плазмонов, проведенное ранее квазиоптическими методами [2]. Однако эти методы ограничены областью частот выше 70 ГГц. Данная работа посвящена исследованию этих возбуждений в области низких частот, для чего используется копланарный волновод.

Для изучения были использованы пленки NbN толщинами 5 и 8 нм, выращенные на подложках высокорезистивного кремния и сапфира. Критическая температура пленок составляла 12.6 К. Из пленок были литографически изготовлены линейные массивы дисков различных геометрий. Затем диски были помещены в щели копланарного волновода, по которому пропусклось субтерагерцовое излучение. На выходе из него при помощи диода Шоттки излучение выпрямлялось и анализировался коэффициент пропускания волновода. Также коэффициент пропускания исследовался при помощи векторного анализатора цепей. Измерения велись при температурах от 4.2К до T_C .

В результате измерений были обнаружены особенности спектра в виде минимумов пропускания с шириной около 100 МГц. Среди них была обнаружена эквидистантная серия. Данная серия обладала линейной дисперсией, скорость которой резко менялась с температурой. Выше T_C эти особенности пропадали. На серию также оказывала влияние геометрия массива дисков. По данному множеству признаков был сделан вывод, что данные особенности соответствуют плазмонным резонансам. Вопрос их соответствия ранее обнаруженным акустическим двумерным плазмонам, измеренными в области высоких частот [2], на данный момент остается открытым.

Литература

[1] R. Carlson and A. Goldman, Propagating order-parameter collective modes in superconducting films, *Physical Review Letters* 34, 11 (1975).

[2] S. A. Andreeva, K. R. Dzhikirba, M. V. Shibalov, A. M. Mumlyakov, I. V. Trofimov, A. V. Shechetilnikov, O. V. Orlov, V. V. Solovyev, V. M. Kovalev, A. V. Chaplik, M. A. Tarkhov, and I. V. Kukushkin Observation of plasma excitations of superconducting electrons in NbN thin films, *Physical Review B*, 113(10), L100503.

Исследование взаимодействия плазмонов в двумерном массиве дисков

А.А. Гаврилов,* К.Р. Джикирба, А.С. Астраханцева, С.А. Андреева, А.В. Щепетильников, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин

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

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

Геометрия диска в ДЭС является классическим объектом для исследования плаз монов ввиду симметричных свойств возбуждаемых мод [1]. В эксперименте для усиления оптического отклика часто используются образцы в форме массива двумерных дисков, характеризующиеся диаметром диска d и периодом сетки a . В большинстве работ период сетки a выбирается таким, чтобы расстояние между соседними дисками $a-d$ было порядка диаметра отдельного диска d [2]. В этом случае взаимодействие между дисками считается слабым, что подтверждается согласованием наблюдаемой картины магнитодисперсии в массиве дисков с теоретическими предсказаниями для одиночных дисков. Теоретически было предсказано уменьшение плазменной частоты при сближении двумерных дисков в графене [3]. В нашей работе экспериментально исследуется этот вопрос в ДЭС на основе $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ квантовой ямы, где литографически был изготовлен массив дисков в виде двумерной сетки с различными периодами $a = 110, 200$ и 300 мкм и фиксированным диаметром диска $d = 100$ мкм. Измеренные магнитодисперсии в субтерагерцовом диапазоне показывают, что экранировка соседними дисками слабо уменьшает плазменную частоту даже при близких расстояниях между дисками.

Литература

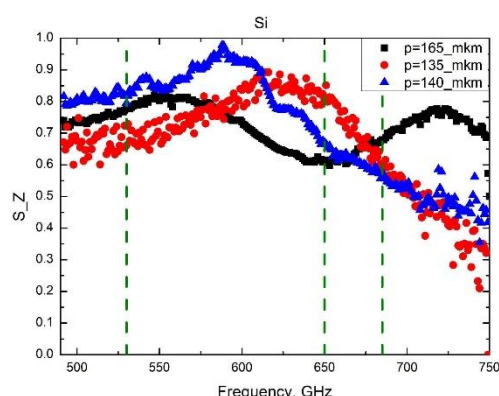
- [1] Муравьев В. М., Кукушкин И. В. Коллективные плазменные возбуждения в двумерных электронных системах //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 10. – С. 1041-1061.
- [2] Allen Jr S. J., Störmer H. L., Hwang J. C. M. Dimensional resonance of the two-dimensional electron gas in selectively doped GaAs/AlGaAs heterostructures //Physical Review B. – 1983. – Т. 28. – №. 8. – С. 4875.
- [3] Barzegar-Parizi S., Rejaei B., Khavasi A. Analytical circuit model for periodic arrays of graphene disks //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2015. – Т. 51. – №. 9. – С. 1-7.

Широкополосная четвертьволновая пластинка в терагерцовом частотном диапазоне на основе кремниевых сеток

К.Р. Джикирба,* А.А. Гаврилов, С.А. Андреева, А.С. Астраханцева, В.В. Соловьев, И.В. Кукушкин

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

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



На сегодняшний день проблема создания простого и в то же время эффективного преобразователя линейной поляризации в круговую поляризацию не решена для диапазона длин волн около терагерцового частотного диапазона. Терагерцовая и субтерагерцовая квазиоптика имеют широкое практическое применение в различных системах неразрушающего контроля, детектирования веществ и контроля безопасности. Инжиниринг метаструктур в данном частотном диапазоне позволяет создавать актуальные материалы с уникальными свойствами [1,2]. Преобразование линейной поляризации в круговую происходит при становлении двух ортогональных компонент поля E_x и E_y равных друг другу с разностью фаз 90° . Существуют разные способы получения электромагнитной волны с круговой поляризацией. Искусственно созданные анизотропные диэлектрики, являются наиболее перспективными для освоения данного диапазона. Во-первых, изготовление таких устройств может быть массовым, что положительно скажется на итоговой цене. Во-вторых, из-за однородного состава в таких устройствах электрические характеристики не будут зависеть от температуры окружающей среды, в отличие от структур с дипольным эффектом на металлических элементах. В-третьих, в таких структурах, как правило, очень малое отражение и высокий уровень прохождения электромагнитной волны в рабочем диапазоне длин волн. В-четвертых, диэлектрические преобразователи поляризации являются широкополосными. Подробный анализ всех типов преобразователей поляризации, которые могут быть реализованы в миллиметровом диапазоне, приведен в работе. В качестве прототипа анизотропного диэлектрика была выбрана решетчатая структура, сформированная на кремниевой пластине. Кремниевые пластины ранее применялись для создания преобразователя поляризации, но лишь в качестве подложки. Данная работа представляет предварительные результаты исследования тонких кремниевых решетчатых преобразователей поляризации для эффективного преобразования линейно-поляризованного субтерагерцового излучения в циркулярно-поляризованное.

Для одного из экспериментальных образцов удалось получить поляризацию с очень параметром стокса Z_3 больше 0.99, что показывает принципиальную возможность получения круговой поляризации используя такой тип кремниевых структур.

Литература

- [1] V. Muravev, K. Dzhikirba, M. Sokolova, A. Astrakhantseva, and I. Kukushkin, "Superdispersive plasmonic metamaterial," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 21, p. 034041, Mar 2024.
- [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 twodimensional electron layer *Appl. Phys. Lett.* 120, 031104 (2022).

Управление фотоактивностью массивов нанотрубок анодного оксида титана

М.Ю. Прудникова, Д.Д. Бутманов, Д.В. Белякова, Т.П. Савчук*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1***e-mail: prudnikovamaria81@gmail.com*

Фотокатализ — эффективная альтернатива биodeградации стойких органических загрязнителей. Метод обеспечивает частичную минерализацию до CO_2 и H_2O в условиях без подачи кислорода, характеризуясь низкой стоимостью и отсутствием вторичных отходов. Среди фотокатализаторов TiO_2 наиболее распространён, однако нанесение его наночастиц на подложку снижает удельную площадь поверхности и ухудшает адгезию [1]. Анодное окисление титана позволяет формировать нанотрубки оксида титана (НТАОТ) непосредственно на подложке, обеспечивая высокую удельную площадь, стабильную адгезию и воспроизводимость свойств. НТАОТ имеют двухслойную структуру: внутренний слой содержит продукты разложения этиленгликоля, внешний — TiO_2 без органических включений. Последующая термическая обработка кристаллизует аморфный оксид, при этом возможно самолегирование углеродом за счёт взаимодействия органических компонентов с TiO_2 .

В настоящей работе предложен метод контроля остаточного углерода в наноструктурированном оксиде титана, основанный на варьировании параметров технологического процесса. Регулирование концентрации углеродных примесей позволяет настраивать оптические свойства материала, в частности проявление фотоактивности под действием видимого света. Проведено исследование влияния таких технологических параметров как — температуры электролита в ходе анодного окисления титана (в диапазоне от -5 до $+40$ °C) и температуры последующего термического отжига (350 – 500 °C) — на фотоактивность и фотокаталитические свойства массивов нанотрубок анодного оксида титана. Установленные закономерности открывают возможности для оптимизации функциональных характеристик материала для задач фотоэлектрохимического преобразования энергии и экологического катализа.

Фотоактивность количественно оценивали по величине стационарного фототока в трёхэлектродной электрохимической ячейке. Для исследования образцов использовался программно-аппаратный комплекс на основе аппаратуры для фотоэлектрохимических измерений Zolix SCS10-PEC. С помощью кремниевого фотодиода фиксируют мощность падающего излучения для каждой измеряемой длины волны. Фотокаталитическую активность полученных образцов оценивали по фотокаталитическому обесцвечиванию водного раствора метиленового голубого (МГ). Обесцвечивание раствора оценивали с помощью спектрофотометра СФ-102. Для расчета изменения концентрации МГ использовали ранее полученную калибровочную кривую. Квантовый выход оценивали методом спектроскопии фототока.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 FSMR-2026-0005 (№075-03-2026-239 от 16.01.2026).

Литература

[1]Zhang J. et al. Photocatalysis //Lecture notes in chemistry. – 2018. – Т. 100.

Оптимизация методики синтеза пористого анодного оксида алюминия как матрицы для оптического детектирования химических веществ

Д.Д. Шитова,* Д.А. Дронова, П.П. Щербаков, Д.Д. Бутманов, Ю.В. Назаркина

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124489 Зеленоград, Москва, Россия

**e-mail: shitova.miet@bk.ru*

Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА) применяется в качестве материала для чувствительных слоёв рефрактометрических сенсоров, которые фиксируют изменение показателя преломления в структуре при адсорбции молекул, благодаря таким свойствам как высокая степень прозрачность в видимом и ближнем ИК-диапазоне излучения, что обеспечивает регистрацию малейших спектральных сдвигов. А упорядоченные нанопоры делают материал эффективным фотонным кристаллом, позволяющим фиксировать изменения показателя преломления при попадании аналита внутрь ячеек. Также ПАОА можно использовать в качестве люминесцентных датчиков, где пористая структура может усиливать сигнал анализируемых веществ. При этом эффект усиления наблюдается не во всех структурах, а на прямую зависит от химического состава. В свою очередь наличие люминесценции самих нанопористых структур оксида алюминия может быть обусловлено внедрением анионов электролита, либо наличием кислородных вакансий.

Целью данного исследования являлось установление взаимосвязи между условиями анодирования и оптическими свойствами ПАОА для создания максимально чувствительных сенсорных структур. Для этого изготовили массив образцов в неорганических электролитах на основе серной и селеновой кислот при концентрациях от 0,5 до 1,5 М. Процессы проводили в широком диапазоне условий: плотность тока варьировали от 5 до 15 мА/см², а температура синтеза составляла 5-40 °С. [1]

В ходе работы была исследована зависимость геометрических параметров структур от параметров синтеза при помощи растрового электронного микроскопа, исследован состав методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Построены спектры пропускания образцов с нанесенным аналитом (в качестве аналита использовали родамин). Образцы, сформированные в электролите на основе щавелевой кислоты, обладали фотолюминесценцией, а образцы, выращенные в электролите селеновой кислоты, не люминесценции.

В результате исследования определены оптимальные параметры анодирования, влияющие на геометрию, химический состав и оптические свойства пористой структуры для применения в качестве матриц для детектирования химических веществ.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 FSMR-2026-0005 (№075-03-2026-239 от 16.01.2026)

Литература

[1] Nazarkina Y.V. Effect of anodization temperature on the morphology and structure of porous alumina formed in selenic acid electrolyte/ Nazarkina Y.V., Zaitsev V.B., Dronova D.A., Dronov A.A., Tsiniiaikin I.I., Butmanov D.D., Savchuk T.P., Kytina E.V., Konstantinova E.A., Marikutsa A.V // *Nanomaterials*. – 2025. – Vol. 15, No. 24. – P. 1855.

Изучение рабочих режимов VBG-лазерных диодов для оценки спектральных смещений и артефактов, обусловленных температурой и мощностью излучения

В.А. Мелехов,* К.Д. Чернявский, А.А. Горюшкин, Д.Н. Артемьев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Самарский университет), 443086, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

*e-mail: vmelehov225@gmail.com

Основным требованием к источникам возбуждения в современной Рамановской спектроскопии является одновременное обеспечение высокой спектральной чистоты, малой ширины линии, длительной долговременной стабильности и компактного исполнения. Стандартные DFB/DBR-лазерные диоды формируют относительно узкий спектр, однако сильно зависят от температуры и тока, что приводит к уширению линии, уменьшению коэффициента подавления боковых мод (SMSR) и появлению скачков мод (mode hopping) [1]. Использование объемной Брэгговской решетки (VBG) в качестве внешнего селективного отражателя позволяет существенно повысить спектральную селективность и устойчивость генерации, обеспечивая стабилизацию длины волны и сужение спектральной линии.

С точки зрения теории, влияние температуры на спектральные характеристики определяется изменением показателя преломления и ширины запрещенной зоны полупроводника, а также температурной зависимостью коэффициентов отражения и дифракции в VBG, что приводит к смещению центральной длины волны в длинноволновую область при нагреве диода и изменению величины внешней обратной связи. Для практических приложений важно задать рабочий температурный диапазон так, чтобы дрейф длины волны оставался в пределах $\approx \pm 0,1-0,2$ нм, что для области 785 нм соответствует изменению порядка единиц см^{-1} по волновому числу и обеспечивает требуемую точность позиционирования рамановских линий.

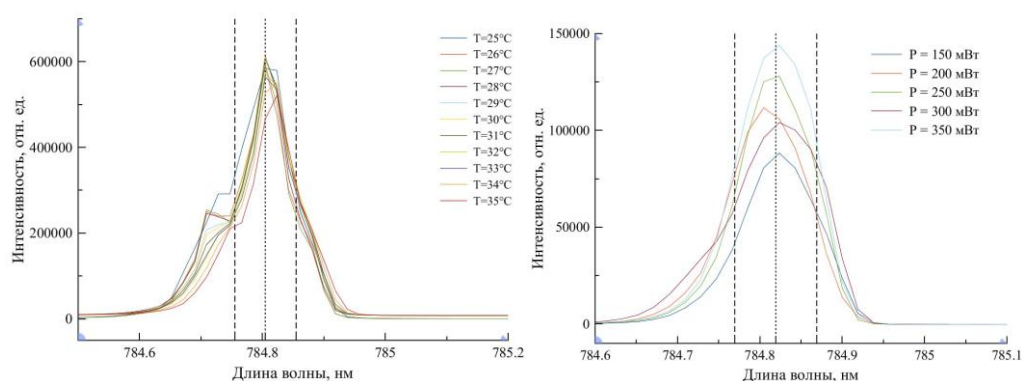


Рис.1. А) Спектры лазерного диода при постоянной мощности 300 мВт и постоянной температуре лазерного диода 25°C, центральная длина волны = 784,80 нм, полуширина спектральной линии 0,1 нм, Б) Спектры лазерного диода при различной мощности излучения при постоянной температуре T=25°C, центральная длина волны = 784,82 нм, полуширина спектральной линии 0,1 нм

Литература

[1] Mobarhan K.S. Test and Characterization of Laser Diodes. Application Note. Newport Corp.

Разработка газового сенсора на основе многослойных массивов нанотрубок диоксида титана, модифицированных наночастицами серебра

Д. Д. Бутманов,* Д. А. Дронова, Т. П. Савчук, А.А. Дронов, Д. Б. Белякова, М. Ю. Прудникова

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

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

На сегодняшний день детекция паров органических веществ в газовых средах необходима для контроля технологических процессов в микроэлектронике, а также перспективна для неинвазивной медицинской диагностики и экологического мониторинга. Использование пористых материалов для создания газовых сенсоров является классическим подходом, который получил особенное развитие благодаря разработке методов синтеза ориентированных упорядоченных наноструктур [1].

Зачастую модификация наноматериалов благородными металлами позволяет увеличить чувствительность и селективность сенсоров за счет усиления каталитического эффекта на поверхности структуры. Этот эффект дополнительно можно усилить путем создания массивов плазмонных наночастиц и их оптического возбуждения излучением соответствующей длины волны [2].

Применение фотоактивных полупроводников с широкой запрещенной зоной дополнительно позволяет повысить чувствительность сенсора благодаря фотокаталитическому разложению аналита. Для этой цели активно применяются массивы нанотрубок анодного оксида титана. Однако из-за шунтирующего протекания тока по металлической (титановой) подложке чувствительность таких образцов сильно снижается.

Для электрической изоляции массива нанотрубок от подложки в данной работе предложен метод повторного анодного окисления после термического отжига. Это позволяет сформировать непроводящий барьерный слой аморфных нанотрубок под проводящим верхним слоем, находящимся в кристаллической фазе анатаза [3]. Поверхность нанотрубок была дополнительно модифицирована наночастицами серебра методом фотокаталитического осаждения. На полученную структуру были напылены встречно-штыревые контакты, после чего измерялось изменение проводимости при добавлении паров этанола в среду газаносителя (гелия).

В результате было продемонстрировано увеличение чувствительности образцов на несколько порядков даже при работе в темновых условиях и без дополнительного нагрева. Была достигнута высокая воспроизводимость измерений, а время отклика составило менее 2 секунд. Использование оптического излучения для фотоактивации сенсора является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 FSMR-2026-0005 (№075-03-2026-239 от 16.01.2026)

Литература

- [1] Zhao J. et al. The challenges and opportunities for TiO₂ nanostructures in gas sensing //ACS sensors. – 2024. – Т. 9. – №. 4. – С. 1644-1655.
- [2] Zhu Z., Kao C. T., Wu R. J. A highly sensitive ethanol sensor based on Ag@ TiO₂ nanoparticles at room temperature //Applied surface science. – 2014. – Т. 320. – С. 348-355.
- [3] Szaniawska-Białas E. et al. Recent Advances in Preparation, Modification, and Application of Free-Standing and Flow-Through Anodic TiO₂ Nanotube Membranes //Molecules. – 2024. – Т. 29. – №. 23. – С. 5638.

Чёрные покрытия на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана

Д.В. Белякова,* Т.П. Савчук, Д.Д. Бутманов, М.Ю. Прудникова*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1***e-mail: darabelakova373@gmail.com*

Сверхчёрные покрытия представляют собой уникальный класс материалов, способных поглощать практически весь падающий на них свет. Такие покрытия используются в аэрокосмической промышленности (для подавления рассеянного света и калибровки инфракрасных камер), оптических системах (для улучшения работы линз) и т.д. Традиционные покрытия на основе углеродных нанотрубок часто недостаточно прочны, поэтому необходим поиск альтернативных структур, сочетающих высокую поглощающую способность с эксплуатационной надёжностью. Материалы на основе оксидов металлов, в частности диоксид титана, представляют научный интерес для создания сверхпоглощающих покрытий. Повышение их эффективности возможно за счет создания наноструктур с развитой поверхностью. В связи с этим целью данной работы являлось исследование различных подходов синтеза сверхчёрных покрытий на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ), обладающих коэффициентом поглощения света свыше 95%, а также высокой адгезией, механической прочностью и термической стабильностью.

Процесс синтеза включал три последовательных этапа. Первоначально методом электрохимического анодирования титановой фольги в фторсодержащем электролите были сформированы упорядоченные массивы НТАОТ. Для придания покрытию сверхпоглощающих свойств проводилась термическая обработка на воздухе. Далее синтезированные массивы подвергались реактивному ионному травлению для удаления разупорядоченного иницирующего слоя, закрывающего входные отверстия пор. Данный подход обеспечил расширение устьев пор по всей площади детали, что позволило достичь эффекта «ловушки света» и подавления зеркального отражения вне зависимости от кривизны поверхности.

Комплексная характеристика полученных материалов проводилась с использованием современных аналитических методов. Морфология поверхности и параметры пористой структуры (диаметр, длина пор, толщина стенок) были изучены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Оптические свойства покрытий исследовались методом спектроскопии диффузного отражения света. Сопоставление структурных, оптических и механических характеристик позволило оптимизировать режимы синтеза и модификации для получения покрытий с поглощением выше 95% и высокой механической прочностью.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 гг. соглашение FSMR-2026-0005.

Литература

- [1] Madhuri D. et al. Flat absorber black PEO coatings on Ti₆Al₄V for spacecraft thermal control application, *Ceramics International* (2022).
- [2] Zheng B. et al. Fabrication of broadband antireflective black metal surfaces with ultra-light-trapping structures by picosecond laser texturing and chemical fluorination, *Applied Physics B*. (2016).

Исследование влияния слоя ГКР-активного материала на процесс горения многослойных термитных структур Al/CuO для экспресс-формирования массивов плазмонных наночастиц

А.И. Новосельцев, * М.Д. Кружалина, Д.В. Новиков, Е.А. Лебедев, С.В. Дубков

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

**e-mail: aleks.novoselcev1999@gmail.com*

В настоящее время широкое применение находят методы детектирования вещества, основанные на спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС). Для реализации данного метода используются специальные наноструктурированные ГКР-подложки. Однако подложки, полученные традиционными методами, обладают существенным недостатком: при хранении вне инертной среды они быстро адсорбируют загрязнения на поверхности и теряют свои функциональные свойства. В связи с этим существует потребность в разработке методик создания ГКР-подложек с увеличенным временем жизни вне инертной среды.

Перспективным решением данной проблемы является метод экспресс формирования массивов плазмонных наночастиц в процессе горения многослойных термитных структур (МТС). Такие структуры содержат несколько чередующихся слоев окислителя и восстановителя, в которых при локальном энергетическом воздействии происходит самораспространяющаяся экзотермическая реакция. Продуктами этой реакции, в том числе, и могут быть массивы плазмонных наночастиц. Также источником для формирования массивов наночастиц могут выступать дополнительный слой ГРК-активного материала в составе многослойной структуры. Наличие дополнительного слоя ГРК-активного материала, приводит к изменению геометрических характеристик многослойной термитной структуры, что может оказать влияние на скорость, характер и интенсивность газовой выделения во время самораспространяющейся экзотермической реакции.

В работе исследовано влияние дополнительного слоя Ag выступающей в качестве ГКР-активного материала, на процесс горения многослойных термитных структур Al/CuO. Формирование структур осуществлялось методом магнетронного распыления мишеней Al, CuO и Ag на установке ЭЛАТО600. Процесс и продукты горения многослойных термитных структур Al/CuO с дополнительным слоем Ag исследовалось при помощи методов высокоскоростной видеосъемки и растровой электронной микроскопии. Оценка ГКР-активности на поверхности структур после горения проводилась на рамановском спектрометре Confotec MR200 с использованием раствора малахитового зеленого концентрацией 10 мкМ/л. В результате работы была получена зависимость усиления ГКР-сигнала от общей толщины многослойной термитной структуры.

Исследование осуществлено в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Моделирование усиления локализованного электрического поля ГКР-структуры Al/CuO/Ag, полученной в результате экзотермической окислительно-восстановительной реакции

М.Д. Кружалина,^{1*} А.И. Новосельцев,¹ Л.С. Волкова,^{1,2} Е.А. Лебедев,¹ С.В. Дубков,¹ Д.Г. Громов¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г.

Зеленоград, пл. Шокина, д. 1

²ИНМЭ РАН, 119049, Москва, Нагатинская ул., 16А, стр. 11

*e-mail: kruzalina43@gmail.com

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) является одним из наиболее чувствительных методов химического анализа, позволяющим детектировать молекулы вплоть до концентраций порядка 10^{-9} - 10^{-12} М. Ключевым фактором, определяющим эффективность ГКР-сенсора, выступает эффект локального поверхностного плазмонного резонанса, возникающий при взаимодействии наночастицах плазмонных металлов, таких как Ag и Cu, с электромагнитным излучением.

Одним из перспективных направлений в ГКР-сенсорики, помимо повышения чувствительности, является повышение сроков хранения в условиях взаимодействия с воздушной атмосферой. Решением может быть экспресс формирование наночастиц непосредственно перед измерением, что позволяет избежать окисления, сульфидизации и иных видов деградации металлических частиц при хранении. В настоящей работе предложено использование метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основе термитной реакции между чередующимися нанослоями алюминия и оксида меди (Al/CuO). Введение в состав многослойной термитной структуры дополнительного слоя Ag позволяет в результате экзотермической реакции сформировать массив металлических наночастиц двухкомпонентного состава, обладающих сложной морфологией и выраженными плазмонными свойствами. Поскольку поиск оптимального соотношения плазмонных компонентов и геометрии массива плазмонных наночастиц для достижения наибольшей интенсивности ГКР-сигнала является трудоемкой задачей на практике, в работе был применен подход математического моделирования методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics с использованием модуля волновой оптики. Расчетная модель позволила визуализировать пространственное распределение локализованного электрического поля (E) в «горячих точках» при возбуждении лазерным излучением с различной длиной волны.

В рамках численного эксперимента были исследованы зависимости E от химического состава массива наночастиц (соотношение Ag/Cu), их среднего диаметра и величины зазора между ними. Установлено, что максимальная расчетная напряженность поля на заданном массиве частиц достигает 8×10^5 В/м. Также были получены ГКР-спектры малахитового зеленого в концентрации 10 мкМ на описанных структурах.

Исследование осуществлено в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорики и плазмонные материалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Исследование влияния органических растворителей на электродинамические свойства ГКР-сенсора на основе наночастиц Ag

**Д.В. Новиков,^{1*} Л.С. Волкова,² А.О. Козлов,³ Д.Г. Громов,¹ Т.С. Гришин,²
А.Г. Байгузина¹**

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

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

³Научно-производственный комплекс «Технологический центр», 124498 Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1, стр.7

*e-mail: tororo@bk.ru

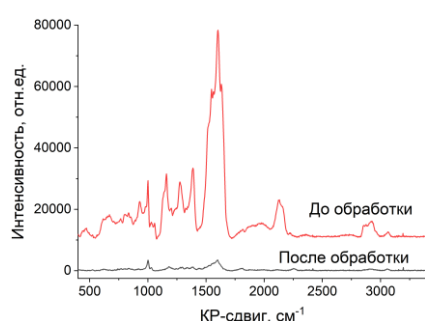


Рис.1. КР-спектры хранимой в замкнутой атмосфере 9 месяцев ГКР-подложки до и после обработки ацетонитрилом.

Сенсоры гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР-сенсоры) представляют собой инструмент для высокочувствительного спектроскопического определения веществ сверхмалых концентраций. Основным элементом ГКР-сенсоров выступает массив плазмонных наночастиц на поверхности твердотельной подложки, часто изготавливаемый из Ag, как металла, обеспечивающего наибольшее усиление сигнала. Часто проблемами таких сенсоров являются сульфидизация наночастиц и адсорбция различных загрязнений поверхностью. Существуют различные пути решения данной проблемы, к примеру: вакуумирование, химическое воздействие слабыми растворами кислот или галогенсодержащих солей, формирование массив

наночастиц на поверхности фотокатализатора.

Одним из перспективных путей решения данной проблемы является обработка ГКР-сенсора органическим растворителем, химически не взаимодействующим с Ag, но растворяющим сорбируемые сенсором загрязнения.

В данной работе исследовалось воздействие ацетонитрила и гексана на планарные Ag ГКР-сенсоры, хранившиеся менее 1 недели, более 9 и 14 месяцев хранения в замкнутой воздушной атмосфере. В качестве контрольного анализа применялся раствор триметиламин N-оксида (ТМАО). Показано, что после 9 месяцев хранения ТМАО концентрацией 10 мкМ на ГКР-сенсоре не детектируется из-за накопленных загрязнений. При обработке гексаном положительного эффекта не наблюдается. Обработка ацетонитрилом ГКР-сенсора, хранившегося даже 14 месяцев, удаляет значительную часть накопленных загрязнений и позволяет детектировать ТМАО. При этом ацетонитрил не накапливается сенсором и не оказывает влияния на морфологию его поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012 (№ 075-03-2026-239/1 от 01.04.2026 г.).

Разработка методики определения карбамида в кормовых смесях методом ГКР-спектроскопии

**Ю.В. Чумаченко,^{1*} Д.В. Новиков,¹ Д.А. Велькер,² К.С. Гетманская,¹
С.В. Дубков¹**

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

²*ООО «Биофарм Алтай», 656049, Алтайский край, Барнаул, ул. Ползунова, 49а*

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

Продуктивность и здоровье крупного рогатого скота в значительной степени определяется полноценностью и сбалансированностью кормления. В практике кормления жвачных животных в рацион могут включаться небелковые источники азота, прежде всего карбамид, который используется микроорганизмами рубца для синтеза микробного белка. При соблюдении норм введения и постепенной адаптации животных карбамид, как правило, не оказывает выраженного отрицательного влияния на параметры рубцового пищеварения, здоровье и продуктивность животного. Однако переизбыток карбамида может сопровождаться избыточным образованием аммиака, что повышает риск гипераммониемии и острого токсикоза [1]. Поскольку печень играет ключевую роль в обезвреживании аммиака и синтезе мочевины, избыток небелкового азота увеличивает метаболическую нагрузку на данный орган и может сопровождаться нарушением обменных процессов у животных. В связи с этим требуется строгий контроль дозировки карбамида в кормах для крупного рогатого скота.

В настоящей работе исследована возможность определения карбамида в кормосмесях методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света, обеспечивающим качественное выявление малых количеств неорганического источника азота как в исходном корме, так и в его выжимке. Для увеличения чувствительности КР-спектроскопии использовались подложки на эффекте гигантского комбинационного рассеяния света на основе Ag наночастиц. В качестве объекта исследования использовали соевый шрот в исходном виде и с добавлением карбамида в разных концентрациях. Спектроскопические измерения выполняли на рамановском микроскопе Confotec MR200. По результатам исследования установлен предел обнаружения карбамида менее 3 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012 (№ 075-03-2026-239/1 от 01.04.2026г.) и за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00610.

Литература

[1] M. Niazifa, Slow-release non-protein nitrogen sources in animal nutrition: A review, Heliyon (2024).

Моделирование плазмонных свойств массива наночастиц Ag на тонкой плёнке MoO₃: влияние геометрических параметров и угла падения излучения

Т. Михайлин,* С.А. Кондратьева, А.И. Новосельцев, Н.А. Негматова, А.Г. Байгузина, А.М. Тарасов

НИУ «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1

**e-mail: tim.mikhail11@gmail.com*

В последнее время все больший интерес вызывают сенсоры, позволяющие объединять несколько методов анализа. Одним из примеров таких сенсоров является наноразмерные капилляры с массивом плазмонных наночастиц на поверхности, которые объединяют методы сканирующей ионно-проводящей микроскопии (СИПМ) и гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Это позволяет проводить исследование механических свойств и химического состава отдельных частей живой клетки *in situ*. Основной задачей при создании таких сенсоров является формирование плазмонных частиц на поверхности, которые будут обладать высокой стабильностью к воздействию окружающей среды и адгезионной прочностью. При этом кончик нанокapилляра не должен перекрываться частицами. Формирование пленки системы Mo-Ag на поверхности капилляра методом ионно-плазменного напыления является одним из подходов при решении данных проблем. Плазмонные наночастицы Ag в таких пленках формируются путем термической обработки не посредственно перед использованием. Эффективность таких сенсоров критически зависит от геометрических параметров наноструктур (размера, формы, взаимного расположения плазмонных наночастиц) и условий проведения ГКР-исследования. Для проведения оптимизации структур и условий измерения применяется моделирование, что позволяет гибко изменять параметры массива.

В работе проведено математическое моделирование распределения напряжённости электромагнитного поля в системе «массив наночастиц Ag – тонкая плёнка MoO₃» методом конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics. Исследовано влияние толщины плёнки, размера наночастиц, расстояния между ними и угла падения возбуждающего излучения ($\lambda = 532$ нм) на коэффициент усиления сигнала гигантского комбинационного рассеяния. Установлено, что толщина плёнки MoO₃ в диапазоне 20-160 нм не оказывает значимого влияния на локальное усиление электромагнитного поля, тогда как вариация диаметра частиц (30-100 нм) и зазора между частицами (нм) приводит к изменению напряжённости в десятки раз. Максимальное усиление достигается при ориентации электрического вектора падающей волны вдоль линии центров соседних частиц.

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

Формирование массива наночастиц Ag из тонкой пленки Mo-Ag методом ионно-плазменного распыления для применения в ГКР-спектроскопии

С.А. Кондратьева,^{1*} А.М. Тарасов,¹ Д.В. Новиков,¹ Н.А. Негматова,¹ Л.С. Волкова,^{1,2} С.В. Дубков,¹ С.А. Гаврилов,¹ Д.Г. Громов¹

¹НИУ «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д.1

²ИНМЭ РАН, 119049, Москва, Нагатинская ул., 16А, стр.11

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

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР) находит широкое применение в областях, где необходим высокочувствительный анализ химического состава веществ: медицина, экология, криминалистика. Одним из популярных материалов используемым в ГКР-сенсорах является Ag в виде наночастиц, так как они обладают наибольшим коэффициентом усиления сигнала. Однако Ag обладает существенным недостатком. Из-за высокой химической активности массив активно взаимодействует с атмосферой, что приводит к сульфидизации поверхности и адсорбции загрязнений. Данные явления приводят к снижению предела детектирования аналитического вещества [1].

Для восстановления работоспособности сенсоры подвергают очистке, например в парах кислот. Альтернативный подход заключается в формировании массива плазмонных наночастиц непосредственно перед измерением, при этом в период хранения плазмонный материал сохраняется внутри плёнки, что исключает контакт с внешней средой. Компоненты этой системы должны быть взаимно нерастворимы друг в друге, например, Mo-Ag. В такой системе Ag заключено в матрицу из Mo. При энергетическом воздействии происходит декомпозиция тонкой пленки и на ее поверхности формируется массив плазмонных наночастиц.

Формирование массива плазмонных наночастиц на поверхности возможно при различных энергетических воздействиях на систему: термическом, электрическом, электромагнитном излучении. Для практического использования важно понимать процессы формирования и эволюции массивов металлических наночастиц.

В ходе работы установлено, что при увеличении содержания серебра в тонкой пленке на основе Mo-Ag, массив частиц формируется во время конденсации пленки методом ионно-плазменного распыления в среде Ar с добавлением N₂. При дальнейшем отжиге системы пленка полностью распадается на островки сплава Mo-Ag. Энергетическое воздействие на плазмонный материал посредством электромагнитного излучения возможно только при его включении в материал прозрачный для данного излучения. В видимом диапазоне прозрачен MoO₃, такая форма оксида молибдена с включениями Ag формируется при распылении системы Mo-Ag при поступлении в камеру газовой смеси Ar:O₂=2:1.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 № FSMR-2026-0005. Формирование пленок производилось в научно-исследовательской лаборатории «Фотонная сенсорика и плазмонные материалы» в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012.

Литература

[1] V.J. Keast, Atmospheric corrosion of silver and silver nanoparticles, Corrosion and Materials Degradation (2022).

Формирование наностержней оксидов металлов путём анодного окисления многослойных структур Si/Ti/Al и Si/Ti/W/Al

П.П. Щербаков,* Е.Б. Клыкова, Ю.В. Назаркина

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1

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

В последние годы все большее внимание уделяется исследованию и свойствам наноструктур на основе оксидов металлов. Наноструктуры на основе оксидов металлов обладают высокой термической стабильностью, развитой удельной поверхностью и возможностью контроля геометрических параметров структуры. Благодаря этим характеристикам данные материалы находят широкое применение в фотокатализаторах, фотоэлектрических преобразователях и литий-ионных аккумуляторах. Особый интерес наноструктурированные оксиды представляют для создания газовых и биологических датчиков [1]. В частности, массивы оксидных наностержней, модифицированные благородными металлами, могут быть применены в сенсорах на основе гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света, обеспечивающих детектирование сверхмалых концентраций органических веществ.

В последнее время усилия исследователей сосредоточены на анодировании многослойных систем, напыленных на кремниевых подложках [2, 3]. Использование алюминия, как одного из слоев структуры, позволяет реализовать механизм матричного роста, где верхний слой алюминия выступает, окисляясь, становится нанопористой матрицей, задающей морфологию и ориентацию формируемых оксидов нижележащих металлов. Однако получение многокомпонентных наноструктур со строго контролируруемыми геометрическими параметрами и фазовым составом остается сложной задачей из-за различий в скоростях окисления металлов и рисков отслоения слоев при переходе границы раздела фаз.

В работе исследовано влияние технологических параметров анодирования многослойных структур типа Si/Ti/Al и Si/Ti/W/Al на кинетику роста и морфологию получаемых наностержней оксидов металлов. Анодирование проводилось в 5% H₂SO₄ при плотности тока 10 мА/см² и температуре электролита 14 °С. Исследовано влияние напряжения анодирования и последующего отжига оксидного композита на морфологию структуры.

Работа выполнена в рамках государственной задания 2026-2028 FSMR-2026-0005 (№075-03-2026-239 от 16.01.2026)

Литература

- [1] H. Zhai, C. Zhu, X. Wang, Y. Y., H. Tang, Analytical Chemistry (2022).
- [2] K. Kamnev, M. Bendova, Z. Pytlíček, J. Prasek, L. Kejík, F. Güell, E. Llobet, A. Mozalev, Ceramics International (2023)
- [3] А. В. Гога, А. А. Позняк, С. М. Завадский, Д. А. Голосов, А. Н. Плиговка, Доклады БГУИР, 20, 5, 40 (2022).

Использование эндогенных порфиринов для детекции микобактерий туберкулеза

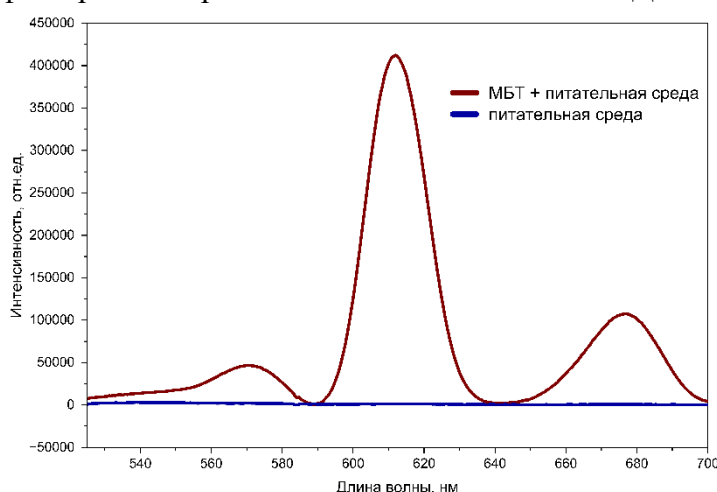
О.А. Амбарцумян^{1,2*} П.И. Елисеев¹

¹ФГБУ НМИЦ ФПИ МЗ РФ, 127473, Москва, ул. Достоевского, д. 4, к. 2

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

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

Известно, что большая часть бактерий, в том числе микобактерии туберкулеза (МБТ), в процессе жизнедеятельности продуцируют порфирины - тетрапиррольные соединения, являющиеся предшественниками гема [1]. Данные соединения обладают выраженной флуоресценцией в области 570 – 700 нм при возбуждении светом в диапазоне 385 – 410 нм, что позволяет использовать эндогенные порфирины в качестве мишени для детекции МБТ [2]. Эндогенные порфирины синтезируются медленно, что является важным ограничивающим фактором их применения для детекции МБТ. Для повышения скорости их синтеза возможно



применение экзогенных индукторов порфиринов [3]. В настоящей работе исследована возможность детекции МБТ с применением индуктора порфиринов, стимулирующего их выработку. Проведено исследование интенсивности флуоресценции МБТ с использованием люминесцентного спектрометра с длиной волны возбуждения 405 нм в жидких питательных средах.

Рис. 1. Спектры флуоресценции, полученные при измерении образца в присутствии (красная линия) и отсутствии (синяя линия) МБТ.

Определено, что при использовании индуктора флуоресценции становится возможным раннее обнаружение значимого сигнала флуоресценции МБТ, вследствие его высокой интенсивности. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейших исследований в области применения флуоресцентных биомаркеров в качестве перспективного подхода для детекции МБТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 25-15-00485, <https://rscf.ru/project/25-15-00485>.

Литература

- [1] Donegan RK, Fu Y, Copeland J, Idga S, Brown G, Hale OF, Mitra A, Yang H, Dailey HA, Niederweis M, Jain P, Reddi AR. Microbiol Spectr. 2022 Oct 26;10(5):e0360422.
- [2] Sun J, Vellappan S, Akdemir J, Steier L, Feinbloom RE, Yadavalli SS. J Microbiol Methods. 2025 Oct; 237:107225.
- [3] Bruce-Micah R, Hüttenberger D, Freitag L, Cullum J, Foth HJ. J Photochem Photobiol B. 2009 Oct 6; 97(1):1-7

ISBN 978-5-6053681-4-4

