

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н.  
Лебедева РАН (ФИАН), д.ф.-м.н.



Савинов Сергей Юрьевич

11 января 2021г.

### Отзыв

ведущей организации на диссертационную работу Ивана Владимировича Андреева «Высокочастотная проводимость и коллективные эффекты в двумерных электронных системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Двумерные системы являются строительными блоками многих современных и потенциально создаваемых в будущем микро- и нано- электронных и оптоэлектронных приборов. В достаточно чистых двумерных системах повышение частоты работы приборов всего до десятков гигагерц, что порядка повсеместно используемых рабочих частот, приводит к возникновению различных эффектов, связанных с возбуждением плазмонов — зарядовых коллективных возбуждений.

Раздел науки, называемый плазмоникой, изучает закономерности в плазмонных системах и возможности построения приборов на их основе. Большинство плазмонных устройств изготовлены из металлов, и откликаются в гораздо более коротковолновой области спектра. Создание же полупроводниковой плазмоники, чему посвящена данная диссертация, в связи с большими значениями диэлектрических постоянных, малыми массами и концентрациями носителей в полупроводниках позволяет работать с терагерцовым и гигагерцовым диапазоном частот.

Освоение данных диапазонов представляет большую важность для человечества, поскольку информационные потоки растут, а емкость канала связи по теореме Котельникова, прямо пропорциональна полосе частот. Также терагерцовые измерения важны для зондирования, например в целях безопасности, или в медицине, для обмена

данными со спутниками. По мере появления качественных детекторов на данный, пока ещё не до конца освоенный диапазон, будут доступны принципиально новые астрономические наблюдения.

Отсутствие хороших приемников на терагерцовый диапазон, большое количество нерешенных задач в полупроводниковой плазмонике двумерных систем обуславливают высокую **актуальность** данного диссертационного исследования.

Диссертация И. В. Андреева «Высокочастотная проводимость и коллективные эффекты в двумерных электронных системах» посвящена исследованию ряда актуальных проблем, связанных с физикой микроволнового отклика двумерных электронных систем, а именно:

- 1) Исследованию акустических краевых магнитоплазмонов в двумерных электронных системах как инструмента для исследования структуры края системы в режиме квантового эффекта Холла.
- 2) Исследованию плазмон-поляритонных эффектов в копланарных микрорезонаторах, что может представлять интерес для опытов по квантовой электродинамике в резонаторе.
- 3) Исследованию СВЧ-индуцированных осцилляций магнитотранспортных характеристик двумерных электронных систем – неординарного физического явления, природа которого до сих пор остается предметом дискуссий.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, перечислены полученные результаты, составляющие научную новизну и практическую значимость работы, и выносимые на защиту положения. Приведены сведения о личном вкладе автора, объеме и структуре работы, сведения об апробации работы (докладах на всероссийских и международных конференциях и семинарах), и публикациях по теме диссертации в рецензируемых журналах.

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены свойства плазменных возбуждений в бесконечных и ограниченных двумерных электронных системах. Основной акцент делается на подробном описании предшествующих работ по акустическим краевым магнитоплазмонам в ДЭС. Также приведены сведения по поляритонным эффектам для плазменных волн в ДЭС. Достаточно

подробно описаны свойства СВЧ-индуцированных осцилляций магнитосопротивления в ДЭС, и связанные с ними противоречия.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных образцов и методик. Описаны параметры использованных полупроводниковых гетероструктур. Приведён технологический маршрут изготовления экспериментальных образцов, включающий в себя травление мез, напыление и вжигание омических контактов, напыление верхних слоёв металлизации. Описана т.н. копланарно-трансмиссионная методика, применявшаяся в диссертации для измерения высокочастотной проводимости ДЭС и спектроскопии микроволнового поглощения в мезоскопических структурах с двумерным электронным слоем, приводятся данные об апробации этой методики.

В третьей главе проведено исследование свойств акустических краевых магнитоплазмонов в ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла при различной ширине профиля электронной плотности на краю структуры. Описана представляющая отдельный интерес методика получения плавного профиля краевого обеднения при помощи неглубокого травления структуры. Показано, что ширина профиля краевого обеднения значительно влияет на амплитуду акустических краевых магнитоплазмонов. Исследована магнитодисперсия акустических краевых магнитоплазмонов и зависимость их относительной амплитуды от магнитного поля. Центральным результатом данной главы является экспериментально установленный факт, что число акустических краевых мод в режиме квантового эффекта Холла конечно, определяется структурой края, и равно числу т. н. несжимаемых полосок на краю образца. Показано, что при понижении температуры на краю ДЭС возникают дополнительные акустических магнитоплазменные моды, связанные со спиновым расщеплением в энергетическом спектре двумерных электронов.

Четвертая глава описывает результаты по исследованию плазмон-поляритонных возбуждений в копланарных резонаторах. Продемонстрировано явление гибридизации двумерных плазменных волн с фотонными модами резонатора. Реализован режим ультрасильной связи между плазменными и фотонными модами. Установлено, что силой взаимодействия мод (частотой Раби) можно управлять, перестраивая электронную концентрацию.

В пятой главе при помощи бесконтактной копланарно-трансмиссионной методики исследованы СВЧ-индуцированные осцилляции высокочастотной проводимости ДЭС. Продемонстрировано, что СВЧ-индуцированные осцилляции наблюдаются и в

бесконтактных измерениях проводимости. Исследовано влияние на их амплитуду частоты измерительного сигнала. Показано, что с ростом частоты измерительного сигнала амплитуда СВЧ-индуцированных особенностей быстро падает.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Исследования, изложенные в данной диссертации выполнены на высоком научном уровне, что подтверждается публикацией работ в ведущем российском (Письма в ЖЭТФ) и зарубежном (Phys. Rev. B) журналах по данной тематике (оба журнала из списка ВАК). Работы автора по тематике диссертации неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и известны специалистам.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Впервые продемонстрирована возможность управления свойствами, в частности магнитодисперсией и минимальным полем наблюдения акустического краевого двумерного магнитоплазмона за счет изменения плавности края образца.
2. Впервые экспериментально продемонстрировано, что количество мод краевого акустического магнитоплазмона в режиме квантового эффекта Холла равно количеству несжимаемых полосок.
3. Впервые реализован режим сильной связи света и плазмонной моды в полосковом микрорезонаторе.
4. Впервые проведено систематическое исследование зависимости амплитуды индуцированных СВЧ полем магнитоосцилляций сопротивления в двумерной системе от частоты измерительного сигнала.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. В разработке методики неглубокого травления пластин с гетероструктурами на основе GaAs/AlGaAs как способа рекордно широкой области краевого обеднения, позволяющего управлять свойствами краевых и акустических краевых магнитоплазмонов.
2. Реализации плазмонного резонатора для двумерной системы, как прототипа прибора с сильной связью двумерного плазмона и электромагнитной волны.
3. В реализации бесконтактных измерений проводящих свойств двумерной системы (на примере исследования свч-индуцированных магнитоосцилляций и Шубниковских

магнитоосцилляций) путем создания микрополосковой линии над двумерным газом. Такой способ позволяет аттестовать роль приконтактных областей (или её отсутствие).

4. В реализации чувствительной схемы двухчастотной регистрации отклика проводящих свойств двумерной системы на СВЧ-поле.

5. В демонстрации принципиального отсутствия роли приконтактных областей в индуцированных СВЧ-излучением магнитоосцилляциях сопротивления двумерной системы, что сокращает возможные варианты теоретического объяснения явления.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. В диссертации используются многочисленные сокращения, которые расшифровываются только при первом упоминании в тексте. Это делает текст трудно читаемым не сначала, и сильно снижает справочную ценность великолепного обзора (первая глава), занимающего почти 40% диссертации. Необходимо было добавить страницу с расшифровкой всех сокращений в конце. Также необходимо было унифицировать все сокращения и писать их по возможности на русском языке, так как сама диссертация на русском. В частности речь идет о названиях «MIRO», «SAD» и «NEDF», «QED».

2. В диссертации есть ошибки в порядках величин, например на стр. 28 в третьей снизу строчке должны быть нм, вместо мкм, а на странице 75 в четвертой строчке под рисунком должно быть  $d=12$  мкм, вместо  $d=12$  мм.

3. В диссертации имеются стилистически плохо построенные предложения. Например на границе страниц 31 и 32 имеется предложение, содержащее 9 строчек текста и 2 формулы. Или предложение, начинающееся с «Наблюдение большого числа...» на стр. 53, также имеет 6 строчек в длину, сложную структуру и несколько типов оборотов.

4. В диссертации имеются многочисленные опечатки, пропущенные знаки препинания, например после первого слова на стр. 41, пропущенный пробел перед скобками «(частоту Раби)» на стр. 42, кавычки у слова «фазы» после формулы 1.59, «результатами<sup>2</sup>» на стр. 64. «ли электроны» на стр. 100.

5. Положения, выносимые на защиту почему-то названы «результатами, выносимыми на защиту» и в некоторых из них формулировка существенно содержит процесс, не являющийся результатом, например «Проведено исследование свойств АКМП в условиях

целочисленного квантового эффекта Холла» или «Исследовано влияние электронной плотности и магнитного поля на гибридизацию мод».

6. В Разделе технологии изготовления структур описание некоторых существенных элементов сильно упрощено:

-в описании процедуры изготовления омических контактов необходимо указать, напыление никеля, германия и золота производилось в одном вакуумном процессе или нет;

- в описании процедуры вжигания контактов необходимо написать, как именно образец перемещался между высокотемпературными областями и температура чего указана, размещался образец на плитке или в трубке в потоке газа. Если просто внести образец в газовой среде на минуту из комнатной температуры в 350 С, то он даже не успеет нагреться.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Большая часть замечаний носит стилистический характер.

Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По объему, научной и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа И.В.Андреева отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Андреев Иван Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертации был представлен И.В. Андреевым «03» декабря 2020 г на семинаре отделения физики твердого тела ФИАН. Отзыв на диссертацию был подготовлен кандидатом физико-математических наук А.Ю. Кунцевичем и утвержден на этом семинаре.

Кандидат физ.-мат. наук (специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния), старший научный сотрудник ФИАН

Кунцевич Александр Юрьевич

+7(499) 1326822, +7(926)2638023 alexkun@lebedev.ru

Председатель семинара,

Доктор физ.-мат. наук (специальность 01.04.07 — физика конденсированного состояния),

Заведующий отделением физики твердого тела ФИАН

Демихов Евгений Иванович

+7(499) 135-41-74 [demihovei@lebedev.ru](mailto:demihovei@lebedev.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект 53.

Подпись сотрудников института Кунцевича Александра Юрьевича и Демихова Евгения Ивановича заверяю, учёный секретарь ФИАН Колобов Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук.



Колобов А.В.