

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Зарезина Алексея Михайловича «Плазменные возбуждения в частично экранированных двумерных электронных системах», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Коллективным эффектом, во многом определяющим электродинамический отклик твердых тел, являются плазменные возбуждения – скоррелированные колебания электронов на фоне положительных ионов кристаллической решетки. При этом случай пониженной размерности, а именно, рассматриваемый далее случай двумерных электронных систем (ДЭС) привлекает повышенный интерес исследователей в силу того, что двумерные плазмоны обладают рядом уникальных особенностей. К таким особенностям относятся сильный корневой дисперсионный закон и возможность сравнительно просто менять концентрацию двумерных электронов. Еще одним преимуществом двумерного случая является высокая чувствительность свойств плазмонов в ДЭС к диэлектрическому и металлическому окружению системы. Диссертация Зарезина Алексея Михайловича посвящена экспериментальному изучению влияния близкого металлического затвора, частично покрывающего ДЭС, на свойства двумерных плазменных возбуждений. В данной диссертации впервые рассмотрены плазменные возбуждения в ДЭС, экранированной узким металлическим затвором, соответствующие квантованию волнового вектора вдоль затвора. Продемонстрировано, что такие плазменные моды принципиально отличаются от хорошо изученных мод в неэкранированных и в полностью экранированных системах. В работе также исследованы условия и механизм возбуждения дополнительной плазменной моды, наблюдаемый при добавлении электрического соединения между затвором и периметрическим контактом к ДЭС. Наконец, еще одной темой, рассмотренной в работе, являются плазменные возбуждения в ДЭС, экранированной боковым копланарным затвором. В такой конфигурации исследован характер зависимости резонансной частоты от степени экранировки, а также обнаружен крайне интересный эффект чувствительности резонансной частоты плазмона к наличию области краевого обеднения ДЭС. Будучи посвящённой исследованию плазменных возбуждений в крайне распространенной конфигурации ДЭС, частично экранированной затвором, диссертация А.М. Зарезина является очень **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 128 страниц с 43 рисунками. Список литературы содержит 130 наименования. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах.

Введение посвящено краткому рассмотрению предмета исследования, обоснованию актуальности и мотивации проведенных исследований, формулированию цели и методов исследований. Во введении приведены положения, выносимые на защиту, представлено описание практической и научной значимости исследований, а также сведения о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях соискателя по теме диссертации, структуре и объеме работы.

В первой главе приводится литературный обзор основных результатов, связанных с экспериментальным и теоретическим исследованием плазменных возбуждений в трехмерном и двумерном случаях.

Вторая глава содержит описание образцов, исследуемых в процессе проведения экспериментов, и используемой экспериментальной методики. В данной главе описана экспериментальная установка, схема подведения возбуждающего СВЧ излучения к образцу и способ детектирования плазменных возбуждений в ДЭС.

Третья глава посвящена результатам экспериментального исследования плазменных возбуждений в конфигурации ДЭС, частично экранированной металлическим затвором в форме узкой полоски. В ходе проведения экспериментов была впервые целенаправленно исследована «проксимити» плазменная мода, соответствующая распространению плазмона вдоль затвора. Было обнаружено, что данное возбуждение имеет крайне необычный закон дисперсии, отличающийся от хорошо известных зависимостей для случаев неэкранированной и полностью экранированной ДЭС. Также был рассмотрен случай частично экранирующего затвора в форме диска. В данном случае фундаментальное плазменное возбуждение продемонстрировало линейный дисперсионный закон, отличающийся от полностью экранированного случая численным множителем.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования дополнительного плазменного возбуждения – релятивистского плазмона, наблюдаемого в частично экранированной ДЭС при условии наличия электрического соединения между затвором и периметрическим контактом. Были исследованы дисперсионная и магнитодисперсионная зависимости данной плазменной моды, а также предложен механизм ее возбуждения. Также была исследована зависимость свойств релятивистского плазмона от параметров электрического соединения между затвором и периметрическим контактом. Было продемонстрировано, что частоту релятивистского плазмона можно существенно уменьшать за счет подключения более длинной соединительной линии. Помимо этого, данное возбуждение удалось пронаблюдать на достаточно низких частотах, при которых обычные плазменные возбуждения имеют чисто релаксационный характер.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию альтернативной конфигурации ДЭС, экранированной боковым копланарным затвором. Была исследована зависимость резонансной частоты от размера щели между краем ДЭС и боковым затвором, предложен качественный подход к описанию данной зависимости. При размерах щели меньше 2 мкм обнаружено отклонение экспериментальных точек от ожидаемой зависимости, объясненное в рамках наличия области краевого обеднения ДЭС. Обнаруженный эффект позволил оценить размер области краевого обеднения ДЭС исходя из наблюдаемого поведения резонансной частоты латерально экранированного плазмона.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертационная работа содержит ряд важных научных достижений и открытий. Среди них:

- Впервые исследовано продольное «проксимити» плазменное возбуждение в ДЭС, частично экранированной затвором в форме узкой полоски. Показано, что дисперсия такого возбуждения принципиально отличается от дисперсионных зависимостей для неэкранированной и экранированной ДЭС.

- Продемонстрирована возможность модификации в широких пределах резонансной частоты и магнитополевого поведения релятивистской плазменной моды путем подключения электрического соединителя подходящей длины между затвором и периметром ДЭС.
- На основе полученных экспериментальных результатов по исследованию латерально экранированных плазменных возбуждений получена оценка размера области краевого обеднения ДЭС.

Диссертационная работа А.М. Зарезина является выполненным на высоком уровне завершенным оригинальным научным исследованием, обладающим единой тематикой. Текст диссертации написан ясно и доходчиво, текст автореферата правильно и полно передает содержание диссертации. В работе приведено **обоснование научных положений**, несущих в себе большую **научную и практическую значимость**. **Достоверность и новизна результатов** диссертации не вызывают сомнений. Поставленная в диссертации цель была достигнута. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 8 печатных работах в рецензируемых научных журналах, а также доложены на международных и российских конференциях.

Также необходимо отметить личный вклад автора – А.М. Зарезин принимал активное участие в постановке задач, в разработке конфигурации образцов, выборе экспериментальной методики, в проведении экспериментов, в обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке и написании научных статей.

Вместе с тем, диссертация не лишена некоторых недостатков:

1. В разделе 2.3 не указан диаметр пятна лазера и область, с которой собирается излучение. Учитывался ли тот факт, что, несмотря на то, что дырки являются неосновными носителями, они могут давать большой вклад в транспорт за счет эффектов амбиполярной диффузии?
2. Почему для описания плазменных возмущений использовался термин «проксимити»? Имеется в виду локализация волн вблизи границы затвора? Как отмечает соискатель, конфигурация с частичным перекрытием ДЭС затвором очень распространена. Почему данные возбуждения не наблюдались ранее? В чем особенность экспериментальной конфигурации в данной работе?
3. В работе отмечаются «гибридные» свойства обнаруженных «проксимити» плазменных колебаний, такие как корневая дисперсионная зависимость, характерная для неэкранированного случая, и корневая зависимость от расстояния между затвором и квантовой ямой, напротив, характерная для полностью экранированного случая. Однако для неэкранированного плазмона в случае, когда двумерная электронная система находится в диэлектрическом слое конечной толщины, резонансная частота также будет зависеть от толщины диэлектрика?
4. Интересно, что в работе не наблюдалось снятие вырождения между объемной и краевой плазменными модами в конфигурации с боковой экранировкой. Нельзя ли добиться их разделения по частоте в нулевом магнитном поле, например, при других геометрических параметрах?

Указанные вопросы имеют уточняющий характер. Они не имеют принципиального значения и не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение. Представленная к защите диссертация Зарезина Алексея Михайловича, учитывая вышеизложенное, является законченной научно-квалификационной работой, посвященной экспериментальному исследованию новых плазменных мод в частично экранированных двумерных электронных системах, а также экспериментальному

исследованию плазменных мод в двумерных электронных системах с боковой экранировкой. Автореферат и научные публикации правильно и полностью отражают содержание диссертации. Считаю, что диссертационная работа «Плазменные возбуждения в частично экранированных двумерных электронных системах» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней»), а ее автор Зарезин Алексей Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», ведущий научный сотрудник, заведующий Лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"

Морозов Сергей Вячеславович

«06» июня 2025 года

Согласен на обработку персональных данных.

Морозов Сергей Вячеславович

«06» июня 2025 года

Подпись Морозова Сергея Вячеславовича заверяю

Ученый секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.

Гапонова Дария Михайловна



Контактные данные оппонента:

Телефон: +7 (831) 417-94-82

e-mail: more@ipmras.ru

Место работы.

Фактический адрес: ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087, Россия

Почтовый адрес: ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

Название организации: Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН)

Телефон: +7 (831) 417-94-82