

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Зарежина 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».

Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах (ДЭС) являются объектом активных научных исследований на протяжении более чем 50 лет в связи с рядом уникальных свойств, демонстрируемых ими. Во-первых, двумерные плазмоны обладают сильным корневым законом дисперсии. Во-вторых, их резонансную частоту можно менять в широком диапазоне путем приложения внешнего магнитного поля, изменения концентрации двумерных электронов или модификации диэлектрического и металлического окружения ДЭС. В контексте последнего варианта наиболее полно исследованными являются два предельных случая конфигурации ДЭС: незэкранированная ДЭС и ДЭС, полностью экранированная близким металлическим затвором. Однако промежуточный случай частично экранированной системы, имеющий крайне широкое распространение как в прикладной, так и в фундаментальной областях, до настоящего времени не был исследован достаточно подробно. Диссертация Зарежина Алексея Михайловича как раз посвящена экспериментальному изучению плазменных возбуждений в частично экранированных ДЭС. В работе проведено экспериментальное исследование влияния близкого металлического затвора, покрывающего только часть площади ДЭС, на двумерные плазменные и магнитоплазменные возбуждения в данных системах. В частности, впервые целенаправленно рассмотрены плазменные возбуждения в ДЭС, экранированных узким металлическим затвором, соответствующие квантованию волнового вектора вдоль затвора. Обнаружено, что такие возбуждения демонстрируют крайне неожиданную дисперсионную зависимость. Также в частично экранированных ДЭС исследована дополнительная низкочастотная мода, возникающая при добавлении электрического соединения между затвором и периметрическим контактом к ДЭС. Показано, что данная мода имеет нетривиальную магнитодисперсионную зависимость и ее свойства можно менять в широком диапазоне путем изменения длины электрического соединения. Кроме того, исследована альтернативная конфигурация ДЭС, экранированной боковым металлическим затвором. Обнаружена универсальная кривая, описывающая уменьшение частоты относительно случая незэкранированного диска в зависимости от размера щели между краем ДЭС и боковым затвором. Помимо этого, обнаружен эффект чувствительности резонансной частоты латерально экранированного плазмона к тому, как устроена область краевого обеднения ДЭС. Понимание того, как устроены плазменные моды в частично экранированных ДЭС важно для правильной интерпретации экспериментальных результатов и оптимизации практических применений. Таким образом, диссертация А.М. Зарежина является 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.

Во введении представлено краткое описание объекта исследования, а также

технологий изготовления исследуемых структур и практических применений. Дано обоснование мотивации и актуальности представленных в диссертации исследований; сформулированы цель и методы исследований. Также приведены положения, выносимые на защиту, и дано описание научной и практической значимости исследований. Во введении приведены сведения о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях автора по теме диссертации, структуре и объеме работы.

Первая глава посвящена литературному обзору основных теоретических и экспериментальных результатов, связанных с трехмерными, поверхностными и двумерными плазменными возбуждениями. Подробно рассмотрены двумерные плазменные возбуждения в различных конфигурациях ДЭС, а также при приложении внешнего магнитного поля к системе.

Вторая глава содержит описание исследуемых образцов, изготовленных на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, а также описывает методику возбуждения и детектирования плазменных резонансов при криогенных температурах в криостате с жидким гелием-4.

В третьей главе представлены результаты, посвященные обнаружению и экспериментальному исследованию «проксимити» продольной плазменной моды в протяженной ДЭС, частично экранированной металлическим затвором в форме узкой полоски. Было обнаружено, что такие возбуждения демонстрируют и корневой дисперсионный закон, и корневую зависимость от расстояния между ДЭС и затвором. Тем самым было показано, что рассмотрение ДЭС с частичной экранировкой не сводится к простому применению формул для неэкранированного и полностью экранированного плазмона для соответствующих участков частично экранированной ДЭС. Аналогично был экспериментально исследован спектр «проксимити» плазменных возбуждений в конфигурации ДЭС, частично экранированной затвором в форме диска. Для данной геометрии фундаментальное «проксимити» плазменное возбуждение продемонстрировало линейный дисперсионный закон, отличающийся от полностью экранированного случая численным множителем.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию релятивистской плазменной моды, возбуждаемой в частично экранированной ДЭС при условии добавления электрического соединения между затвором и периметрическим контактом ДЭС. Было обнаружено, что данная плазменная мода демонстрирует нетривиальную магнитодисперсионную зависимость и возбуждается на неожиданно низких частотах. В диссертации предложен физический механизм для таких колебаний, заключающийся в перетекании заряда из ДЭС в затвор через электрическое соединение. Также были исследованы эффекты гибридизации релятивистского плазмона с фотонной модой соединительной электрической цепи. Было продемонстрировано, что резонансную частоту и магнитополевое поведение релятивистской плазменной моды можно менять в широком диапазоне для одной и той же ДЭС путем подключения различных соединительных цепей электрических цепей. Кроме того, благодаря сильной гибридизации с фотонной модой, релятивистский плазмон удалось пронаблюдать на достаточно низких частотах, при которых обычные плазменные возбуждения имеют чисто релаксационный характер.

В пятой главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования ДЭС с боковой экранировкой копланарным металлическим затвором. Была обнаружена зависимость резонансной частоты латерально экранированного плазмона от размера щели между краем ДЭС и боковым затвором. Было показано, что

экспериментальные точки, соответствующие резонансной частоте в нулевом магнитном поле, для образцов с разным диаметром и разной концентрацией двумерных электронов ложатся на универсальную кривую в координатах частоты, нормированной на частоту незэкранированного плазмона в диске, и размера щели между ДЭС и боковым затвором, нормированного на диаметр диска. Также было обнаружено, что латерально экранированный плазмон чувствителен к наличию области краевого обеднения ДЭС. Данный эффект позволил определить характерный размер области краевого обеднения ДЭС, составивший 0.5 мкм.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

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

- Впервые целенаправленно исследовано «проксимити» продольное плазменное возбуждение в ДЭС, частично экранированной затвором в форме узкой полоски. Исследована дисперсия данного возбуждения, а также приведено качественное описание характера таких колебаний, объясняющее наблюдаемое поведение.
- Для релятивистского плазменного возбуждения предложен физический механизм, описывающий возбуждение данной плазменной моды. Продемонстрировано, что резонансную частоту релятивистского плазмона можно менять путем подключения различных соединительных электрических цепей между затвором и периметрическим контактом ДЭС.
- Также обнаружен крайне многообещающий эффект чувствительности резонансной частоты латерально экранированного плазмона к тому, как устроена область краевого обеднения ДЭС.

Полученные в диссертации А. М. Зарезина результаты являются актуальными, новыми и представляют научный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. **Актуальность, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и достоверность полученных в работе результатов** не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в 8 печатных работах в высокорейтинговых научных журналах. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен четко и понятно. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Необходимо отметить личный вклад автора – Зарезин А. М. принимал активное участие в постановке задач, в выборе методологических подходов, 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. Как правило, автор использует для качественного объяснения обнаруженных в диссертации эффектов (например, при вычислении частоты «проксимити» продольной плазменной моды в протяженной ДЭС, частично экранированной металлическим затвором в форме узкой полоски в Главе 3) физически наглядную LC-модель, оценивая эффективные значения емкости и индуктивности из

геометрических параметров системы. С одной стороны, хорошо, что такие наглядные модели работают, но с другой – несколько недостает сравнения с какими-то более точными расчетами, например, распределения тока как непосредственно под затвором, так и в незранированной области по бокам от затвора.

2. На мой взгляд, следовало бы несколько более подробно описать, какого рода численные модели использовались в диссертации для сравнения с экспериментом. Например, в Главе 5, при обсуждении роли «бокового» затвора, эксперимент сильно расходится с результатами никак не описанного численного моделирования в области малой ширины боковой щели (между затвором и ДЭС), см. вставку на рис.5.4. Далее в диссертации объясняется, что это может быть связано с не-ступенчатым распределением плотности заряда вблизи границы ДЭС, и, таким образом, делает систему чувствительной к области краевого обеднения ДЭС. Повидимому, следовало бы привести результаты моделирования с учетом такого обеднения ДЭС.
3. Подписи к рисункам не всегда содержат полное описание обозначений на этих рисунках. Например, в подписи к Рис. 3.6а не объясняется, в чем отличие сплошных точек от полых. К счастью, в тексте это объясняется, но чтение диссертации затрудняется.
4. В тексте диссертации и автореферата можно встретить некоторые неточные формулировки. Например, структура с затвором в виде узкой полоски, изучаемая в Главе 3, неоднократно называется одномерной. Хотя она очевидно квази-одномерная, и, собственно, об этом свидетельствуют и полученные в этой главе результаты.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся законченным и оригинальным научным исследованием.

Заключение. Диссертационная работа Зарезина Алексея Михайловича является законченной научно-квалификационной работой, содержащей рассмотрение актуальной с научной и практической точки зрения задачи об устройстве плазменных возбуждений в частично экранированных двумерных электронных системах, а также в двумерных электронных системах с боковой экранировкой. 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 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», член-корреспондент РАН, профессор Кафедры общей физики и физики конденсированного состояния Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

« 6 » июня 2025 года

Тиходеев Сергей Григорьевич

Согласен на обработку персональных данных.

« 6 » июня 2025 года

Тиходеев С. Г.

Подпись сотрудника МГУ имени М.В.Ломоносова

С.Г. Тиходеева удостоверяю:

И.о. декана Физического факультета

ФГБОУВО «МГУ имени М.В.Ломоносова»

доктор физико-математических наук, профессор

БЕЛОКУРОВ Владимир Викторович



« 11 » июня 2025 г.

Контактная информация:

Почтовый адрес: Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1

Телефон: +7 (495) 939-39-18

e-mail: tikh@gpi.ru