

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ
им. Л.Д. ЛАНДАУ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**
142432 Московская обл., г. Черноголовка,
проспект Академика Семенова, д. 1А
тел./факс: (495)702-93-17, (49652)2-19-58

“УТВЕРЖДАЮ”
Директор ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН
И.В. Колоколов



09 июня 2025 № 11216/45

ОТЗЫВ

ведущей организации по диссертации Зарезина Алексея Михайловича на тему «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».

Изучение коллективных мод в двумерных электронных системах является одной из важных задач физики конденсированного состояния на протяжении уже более 40 лет. С фундаментальной точки зрения изучение коллективных мод представляет огромный интерес, так как позволяет исследовать эффекты межчастичного взаимодействия в двумерных электронных системах. В последнее время появился и большой практический интерес в изучении коллективного отклика двумерной электронной системы на внешнее электромагнитное поле в связи с попытками создать на основе таких систем приборы терагерцовой электроники. Интересно, что несмотря на относительно простую формулировку задачи, теоретическое описание коллективного отклика двумерной системы на внешнее электромагнитное поле (даже без учета квантовых эффектов) остается актуальной областью исследований. В настоящее время значительный интерес проявляется к двумерным электронным системам, у которых затвор закрывает лишь часть поверхности двумерного газа. Такая постановка естественна для реализации терагерцовых устройств, так как позволяет более эффективно управлять свойствами двумерной системы. В настоящее время имеется несколько теоретических подходов к описанию коллективного отклика в таких системах и поэтому именно экспериментальные данные служат окончательным инструментом для выбора правильной теории. Все это показывает несомненную **актуальность** диссертационного исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Во **введении** дано краткое введение в предмет диссертационного исследования. **В первой главе** диссертации приводится литературный обзор о изучаемых в диссертации структурах и о теории коллективных мод в двумерных электронных системах. **Во второй главе** приведено описание исследуемых двумерных наноструктур, кратко изложена технология изготовления образцов, обсуждаются методики детектирования плазменных резонансов. Также дано описание экспериментальной установки.

В третьей главе рассматриваются две экспериментальные задачи по измерению “проксимити” плазмонной моды в частично-экранированном двумерном электроном газе с затворами в форме полоски и диска, соответственно. Полученные экспериментальные результаты сравниваются с предельными случаями неэкранированного и экранированного двумерного газа. Детально обсуждается отличие спектра “проксимити” плазмонной моды в случае полоскового затвора и затвора в форме диска. К интересным находкам данной главы можно отнести интерпретацию автора диссертации частоты “проксимити” плазмонной моды как частоты колебаний в эффективном L-C контуре.

В четвертой главе изучаются коллективные моды частично-экранированной электронной системы при наличии электрического соединения между затвором и контактом. Такая схема позволила автору диссертации исследовать коллективные моды в ситуации, когда становится важным запаздывание распространения электромагнитной волны. Как инструмент для изучения плазменных колебаний в этой главе используется перпендикулярное магнитное поле, которое модифицирует известным образом их спектр. Полученные экспериментальные результаты сравниваются с теорией. Также для объяснения полученных экспериментальных зависимостей строится эффективный L-C контур.

В пятой главе изучаются коллективные моды в случае необычной геометрии: латеральный затвор находится сбоку от двумерного электронного газа. В такой геометрии частота плазмонного резонанса начинает зависеть от расстояния между краем двумерного электронного газа и краем затвора. В случае круговой геометрии показано, что частота зависит только от отношения величины зазора к диаметру двумерного электронного газа.

Представленные в диссертации экспериментальные результаты по поведению плазменных колебаний в частично-экранированных двумерных системах показывают, что имеющиеся теоретические представления о поведении коллективного отклика двумерного

газа на внешнее электромагнитное поле являлись не полностью соответствующими действительности. Оказалось, что в случае затвора, не полностью закрывающего двумерный электронный газ, у плазменных мод имеется интересная специфика. В тоже время в диссертации показано, что результаты для спектра плазменных колебаний в различных конфигурациях затвора, частично экранирующего двумерный электронный газ, могут быть единообразно описаны в рамках модельных колебаний в эффективном L-C контуре. С практической точки зрения особенно стоит отметить результаты, представленные в пятой главе, где использование бокового латерального затвора открывает возможность изучения края двумерного электронного газа с помощью плазменных колебаний. Таким образом, **научная и практическая значимость** диссертации А. М. Зарезина не оставляет сомнений.

Достоверность и обоснованность представленных результатов подтверждается использованием отработанной методики измерений, согласием с имеющимися теоретическими результатами, публикацией результатов в ведущих российских и международных рецензируемых научных журналах и представлением результатов на российских и международных конференциях.

По диссертации следует высказать следующие **замечания**:

1. На странице 16 диссертации под формулой 1.7 используется словосочетание “плазменное приближение”. Такой термин обычно не принято использовать в физике двумерных систем. Обычно для характеристики рассматриваемой ситуации используют следующие термины: бесстолкновительный режим, гидродинамический режим, баллистический режим, диффузионный режим. Имело бы смысл более детально прокомментировать исследуемый режим в общепринятых терминах.
2. Название “*проксимити*” плазменные возбуждения кажется неудачным. Из текста диссертации не очень ясно чем это возбуждение отличается от специального вида краевого плазмона. Возможно, что это обсуждается в оригинальных теоретических работах, но имело бы смысл обсудить и в диссертации. Правильно ли думать, что эта плазменная мода локализована около границы затвора? Если этот плазмон отличается от краевого, то может быть лучше было бы его называть около-затворный плазмон, например.

3. В работе совершенно не обсуждается структура линии плазменного резонанса, в частности его ширина. В обычном двумерном электронном газе ширина резонанса позволяет, например, определить механизмы рассеяния. А как в случае проксимити-плазмона? Чем определяется его ширина, от чего зависит, какие физические механизмы определяют его время жизни?

4. В формуле 4.11 присутствует опечатка. И в числителе и в знаменателе этой формулы должно быть $1-i\omega\tau$. Знак минус связан с причинностью: физическая проводимость имеет полюса только в нижней полуплоскости комплексной частоты.

5. Не очень понятно за счет чего возникает обеднение электронного газа около границы затвора в структуре, изучаемой в пятой главе диссертации. В частности из диссертации не ясно имеется ли разность потенциалов между двумерным электронным газом и затвором? Если такая разность потенциалов имеется, то ширина слоя обеднения пропорциональна корню из разности потенциалов между двумерным электронным газом и затвором. Как можно влиять экспериментально на ширину слоя обеднения, если напряжения не приложено? В диссертации хотелось бы более убедительных аргументов, почему достаточно заменить $\hbar$ на $\hbar + I_d$.

Представленные выше замечания носят частный характер и не влияют ни на основные результаты диссертации, ни на защищаемые положения.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 8-ми научных работах в отечественных (Письма в ЖЭТФ, Известия РАН) и зарубежных журналах (Phys. Rev. B), доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.М. Зарезина является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи о экспериментальном изучении плазменных колебаний в двумерном электронном газе с частичной экранировкой. Полученные в диссертации результаты имеют важное значение для развития физики двумерных электронных систем в частности, и физики конденсированного состояния в целом. Таким образом, диссертационная работа несомненно удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней" утвержденного постановлением Правительства Российской

Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Алексей Михайлович Зарезин безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.8 -физика конденсированного состояния**.

Доклад А.М. Зарезина по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре сектора квантовой мезоскопии ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН 5 июня 2025 г. На семинаре присутствовало 15 человек, из них д.ф.-м.н. - 7 чел., к.ф.-м.н. - 3 чел. Отзыв подготовлен заведующим сектором квантовой мезоскопии ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, доктором физико-математических наук Михаилом Андреевичем Скворцовым и одобрен на заседании семинара сектора квантовой мезоскопии ИТФ ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН 7 июня 2025 г.

Заведующий сектором квантовой
мезоскопии ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.02 - Теоретическая физика)

Скворцов Михаил Андреевич

Адрес: 142432 Россия, Московская область, г. Черноголовка,

просп. акад. Семенова, 1а

тел. 8-495-702-93-17

e-mail: skvor@itp.ac.ru

Согласен на передачу персональных данных



М.А. Скворцов

Подпись М.А. Скворцова удостоверяю:

ученый секретарь ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН

к.х.н. С.А. Крашаков

