

ОТЗЫВ НАУЧНОГО ОППОНЕНТА

Качоровского Валентина Юрьевича на диссертационную работу Родионова Данила Александровича «Плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах: роль эффектов электромагнитного запаздывания», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа посвящена теоретическому изучению ряда новых и интересных эффектов плазмоники – новой области электроники, бурно развивающейся в последнее время. Интерес к этой тематике обусловлен в первую очередь высокой скоростью распространения плазменных волн. Как следствие, диапазон рабочих частот для типичных микронных и субмикронных размеров плазмонных приборов попадает в очень важный для приложений терагерцовый интервал. Скорость двумерных плазмонов можно легко менять напряжением на затворе, что открывает новые возможности по управлению плазмонными приборами.

Работа сфокусирована на теоретическом анализе свойств плазменных колебаний в различных латерально ограниченных двумерных электронных системах, в которых скорость света не считается сколь угодно большой, т.е. важны эффекты электромагнитного запаздывания. Интерес к таким системам возник примерно в 1989 г., когда в теоретических работах В.И. Фалько, Д.Е. Хмельницкого, А.О. Говорова и А.В. Чаплика были предсказаны необычная динамика электронов и слабое затухание плазменных колебаний в таких латерально неограниченных двумерных системах. Однако, экспериментально подобные системы начали исследовать лишь совсем недавно, в основном в структурах в форме дисков, т.е. латерально ограниченных. Поэтому представленные в диссертации результаты являются **актуальными и важными**, например, для интерпретации экспериментальных данных по микроволновой микроскопии латерально ограниченных систем с запаздыванием. Кроме того, в последнее время также возник и растет интерес к новым двумерным системам и материалам, среди которых многие обладают анизотропным в плоскости системы электронным спектром. Исследование таких систем, также представленное в диссертации, является **важным и своевременным**.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, четырёх приложений и списка литературы из 111 наименований, включая 23 ссылки на работы диссертанта. Общий объем диссертации составляет 96 страниц. Автореферат вполне подробно отражает основное содержание и результаты работы.

Во введении изложена актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также представлены положения, выносимые на защиту. **Обзор литературы** дает представление о свойствах плазменных колебаний в первую очередь в латерально неограниченных (бесконечных) электронных системах в режиме, когда важно электромагнитное запаздывание, а также приводит некоторые результаты о свойствах плазменных колебаний в латерально ограниченных системах в квазистатическом пределе.

Первая глава является вспомогательной для второй и третьей глав. Здесь изложен подробный вывод интегро-дифференциального уравнения на плотность тока в экранированной металлическим задним затвором двумерной электронной системе в форме диска, позволяющего изучать отклик такой системы на внешнее электромагнитное излучение. Для его получения использовались уравнения Максвелла совместно с локальным законом Ома. Проводимость рассмотрена в рамках модели Друде. Введены удобные для дальнейшего изложения безразмерные параметры, в частности, параметр

запаздывания, который отражает степень влияния эффектов электромагнитного запаздывания на свойства плазменных колебаний в диске. Представлен способ решения полученного уравнения и методы его анализа.

Во второй главе исследована зависимость частоты и ширины резонансов в спектре поглощения электромагнитного излучения, соответствующих возбуждению фундаментальной и основной осесимметричной плазменных мод, от параметров двумерной электронной системы без металлического затвора. Показано, что частота этих резонансов может быть оценена из дисперсии плазмон-поляритонов в бесконечной системе, если подходящим образом выбрать размерно-квантованный волновой вектор. Для ширины плазменных колебаний такой подход, в принципе, может быть использован, однако лишь в пределе малости радиационных потерь в системе. В работе проведен учет радиационных потерь и показано, что с ростом параметра запаздывания сначала происходит уменьшение ширины плазменных резонансов, а затем увеличение до некоторого асимптотического значения.

В третьей главе рассмотрены те же плазменные колебания при наличии металлического затвора в системе. Исследовано изменение свойств плазменных резонансов при переходе от незранированной системы до сильно экранированной, когда расстояние между системой и металлом много меньше радиуса диска и характерной длины волны плазмона. В последнем случае задача решена точно, и найдены выражения для положения и ширины резонанса. При больших расстояниях найдены их аналитические аппроксимации, которые хорошо совпадают с результатами численного расчета. Показано, что при малом запаздывании сближение двумерной электронной системы и затвора приводит к возникновению осцилляций в ширине линии около значения, соответствующего незранированной системе.

Четвертая глава посвящена изучению свойств собственных магнитоплазменных колебаний в сильно экранированной анизотропной двумерной электронной системе в форме полосы с учетом электромагнитного запаздывания. Рассматриваются системы, где поверхностью Ферми носителей заряда является эллипс, произвольно ориентированный относительно края полосы. Проводимость системы выбрана в рамках динамической модели Друде, учитывающей анизотропию и внешнее магнитное поле. Найдены точные аналитические выражения для частоты всех плазменных колебаний в такой системе. В частности, установлено, что частота фундаментальной моды, являющейся краевым магнитоплазмоном, не зависит от величины магнитного поля. Частота остальных мод с ростом магнитного поля монотонно возрастает и стремится к значению пропорциональному циклотронной частоте, где коэффициент пропорциональности меньше единицы за счет электромагнитного запаздывания и не зависит от ориентации поверхности Ферми.

В заключении подведены основные результаты диссертационной работы.

В диссертационной работе автор пользуется проверенными моделями, которые хорошо зарекомендовали себя при решении аналогичных задач. Все выводы хорошо обоснованы, а результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому достоверность и научная обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений. Работы диссертанта хорошо известны по докладам на ведущих российских и международных конференциях, а также выступлениям на различных научных семинарах, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, и опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Вместе с тем, в ходе изучения диссертационной работы, у меня возникли следующие замечания:

1. Для оценки важности эффектов запаздывания автор вводит специальный параметр запаздывания, равный по порядку величины квадрату от произведения фундаментальной плазменной частоты на время пробега света через систему. По этому параметру разлагается плазменная частота и ширина плазменного резонанса. В то же время, в ряде работ для оценки эффектов запаздывания, в том числе, для оценки отношения радиационного затухания к темпу примесного затухания, использовался другой параметр, а именно отношение двумерной проводимости к скорости света (см., например, формулы (40) в работе S. A. Mikhailov, Phys.Rev. B 58, 1517 (1998)). Было бы интересно выяснить, в каких случаях для оценки важности эффектов запаздывания нужно использовать один параметр, а в каких другой. К сожалению, в работе отсутствует обсуждение данного вопроса.
2. В работе показано, что эффекты запаздывания могут приводить к уменьшению ширины плазменного резонанса, которая даже может стать меньше ширины, обусловленной упругим рассеянием на примесях. Это достаточно сильное утверждение, на мой взгляд, требует чуть более подробного физического анализа, чем обсуждение представленное в пункте 2.1.2. «Качественное объяснение ширины плазменного резонанса». В частности, хотелось бы понимать, когда ширина плазменного резонанса попросту равна сумме примесной и радиационной ширин, как это, например, имеет место в упомянутой в первом замечании статье, а когда описывается более сложным выражением, представленным в работе диссертанта. Соответствующие комментарии в работе отсутствуют

Сделанные замечания не являются критическими и скорее являются пожеланием для дальнейшей работы. Они никак не влияют на общую оценку работы, которая выполнена на самом высоком уровне.

Таким образом, диссертация Родионова Данила Александровича представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяющее всем требованиям п.9. «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 с изменениями от 16.10.2024 г, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Родионов Данил Александрович заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – «Физика полупроводников»), главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

«26» мая 2025 г.



Качоровский Валентин Юрьевич

Контактная информация:

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

Телефон: + 7(921) 9941081

e-mail: kachor.valentin@mail.ioffe.ru, kachor.valentin@gmail.com

Подпись В.Ю. Качоровского заверяю

зам. зав. отделом кадров Жер. Н.С. Буценко

