

Утверждаю

Директор ФГБУН Института физики твердого тела Российской академии наук
доктор физико-математических наук
Левченко Александр Алексеевич



14 мая 2018 г.

Отзыв ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела Российской академии наук на диссертационную работу Заболотных Андрея Александровича «Свойства плазменных возбуждений в двумерных электронных системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Актуальность темы диссертационной работы.

Плазменные колебания или плазмоны в двумерных (2D) электронных системах исследуются уже более 30 лет как теоретически, так и экспериментально. Большой интерес к 2D плазменным колебаниям связан с двумя факторами. Во-первых, их частотой можно относительно легко управлять, меняя концентрацию носителей заряда в 2D электронной системе с помощью металлического затвора, расположенного вблизи 2D системы. Во-вторых, частоты 2D плазмонов, соответствующие характерным параметрам 2D систем, лежат в терагерцовой и субтерагерцовой областях. Соответственно, на плазмонном механизме возможно создание и уже созданы детекторы и источники терагерцового излучения.

Относительно недавно, в связи с развитием технологии, стало возможным экспериментальное исследование плазмонов в высокоподвижных структурах (подвижность порядка $10^6 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) с концентрацией 10^{12} см^{-2} и с латеральными размерами порядка 1 мм. На свойства плазменных колебаний в таких системах сильно влияет электромагнитное запаздывание, оно изменяет спектр плазмонов, их добротность и другие свойства. Однако, существует явный недостаток теоретических на эту тему. В связи с этим, первая и вторая главы диссертационной работы А.А. Заболотных, посвященные влиянию электромагнитного запаздывания на спектр и свойства объёмных и краевых плазмонов, без сомнения, являются актуальными.

Также в последние 15 лет активно идёт исследование двумерных систем, находящихся под действием микроволнового излучения и помещённых в магнитное поле, ортогональное плоскости 2D системы. В этих системах наблюдается ряд необычных явлений, например, состояния с нулевым продольным сопротивлением. Экспериментальное и теоретическое изучение этих систем продолжается и сейчас. Третья глава диссертации А.А. Заболотных посвящена особенностям в отклике таких систем при частоте излучения, равной удвоенной циклотронной частоте электронов, и, конечно же, исследования, проведённые в этой главе, **являются актуальными.**

Научная новизна и достоверность полученных результатов.

Диссертация А.А. Заболотных состоит из введения, обзора литературы, трех оригинальных глав, заключения и приложения.

Во введении приводятся актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и значимость, положения, выносимые на защиту.

Обзор литературы посвящен плазменным колебаниям в трёхмерных и двумерных электронных системах, влиянию на 2D плазмоны электромагнитного запаздывания, постоянного внешнего магнитного поля, конечности времени электронной релаксации. Кратко обсуждаются свойства краевых плазмонов и явление параметрического резонанса.

В первой главе диссертации рассмотрены спектры магнитоплазмонов при учёте электромагнитного запаздывания, т.е. спектры магнитоплазмон-поляритонов, в 2D электронной системе с диссипацией. Показано, что магнитоплазмон-поляритоны добротны при частотах, меньших обратного времени электронной релаксации, даже в 2D системе с малой проводимостью, если внешнее магнитное поле достаточно сильное. Интересный результат этой главы – в спектре магнитоплазмон-поляритонов появляется дополнительная ветка, имеющая точку окончания, в которой добротность обращается в бесконечность, несмотря на диссипацию в системе.

Во второй главе исследуются спектр и свойства краевого плазмона-поляритона. Рассматривается резкий край 2D электронной системы, т.е. на краю концентрация носителей заряда скачком обращается в нуль. Вдоль края распространяется плазмон, поля и заряды которого локализованы вблизи края. Показано, что такой плазмон, как и объёмный, при учёте электромагнитного запаздывания становится добротным даже при частотах, меньших обратного времени электронной релаксации, если проводимость 2D системы, имеющая в системе единиц СГС размерность скорости, сильно превосходит скорость света.

В третьей главе предложен механизм отклика 2D электронной системы в магнитном поле на микроволновое излучение с частотой, равной удвоенной циклотронной частоте электронов. Механизм призван объяснить пик в фотосопротивлении 2D систем на удвоенной циклотронной частоте, который недавно наблюдался экспериментально. Механизм основан на явлении параметрического резонанса в двумерной электронной системе. Известно, что параметрический резонанс в колебательной системе может возникать, если частота изменения параметров системы равна удвоенной собственной частоте. В случае 2D системы в магнитном поле роль собственной частоты играет циклотронная частота электронов, а внешнее излучение изменяет дрейфовую скорость электронов. Если электрическое поле, возникающее из-за микроволнового излучения, является неоднородным, то циклотронное и дрейфовое движения могут «перепутываться» и приводить к резонансу. Неоднородное электрическое поле наводится контактами и краями образца, которые также находятся под действием микроволнового излучения. Развитие параметрического резонанса приводит к разогреву 2D системы и пику в сопротивлении, который и наблюдался в недавних экспериментах.

Таким образом, можно утверждать, что диссертационная работа содержит ряд **новых научных результатов**. При проведении расчётов автор использовал стандартный классический подход для описания динамики электронов в 2D системе (уравнение Эйлера для средней скорости электронов, уравнения Максвелла для связи токов, зарядов и полей), что даёт основание считать полученные результаты **достоверными**.

Практическая значимость.

Полученные результаты могут быть использованы для создания и совершенствования источников и приёмников терагерцового излучения, действие которых основано на плазмонном принципе.

Замечания.

Диссертация А.А. Заболотных написана простым физическим языком и производит хорошее впечатление, однако в процессе её чтения возникает несколько вопросов и замечаний.

- В первой главе все расчеты производятся в предположении, что двумерная электронная система имеет бесконечный размер. Это условие практически никогда не выполняется на практике. Было бы познавательно узнать, как модифицируются теоретические результаты по поведению плазмон-поляритонных волн при учете конечных размеров образцов.

- Во второй главе диссертации анализируется спектр плазмона, распространяющегося вдоль прямолинейного края двумерной электронной системы при учете электромагнитного запаздывания. Теоретически рассматривается случай бесконечно резкого края, который никогда не реализуется экспериментально. Хотелось бы порекомендовать автору, привести условия на «плавность» края, при которых его теоретические расчеты являются правомерными.

Сделанные замечания, однако, не являются принципиальными, не отражаются на научной новизне, практической значимости работы и нисколько не снижают её высокий уровень, а носят, скорее, характер пожеланий для проведения дальнейших исследований.

Диссертация А.А. Заболотных является актуальной научной работой, выполненной на высоком научном уровне, и содержит решение задач о свойствах плазмонов в двумерной электронной системе. Материалы диссертации опубликованы в ведущих отечественных (Письма в ЖЭТФ) и зарубежных журналах (Phys. Rev. B), докладывались автором на российских и международных научных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По своему научному уровню, актуальности, новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов диссертация А.А. Заболотных «Свойства плазменных возбуждений в двумерных электронных системах» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям ВАК, предъявляемым диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Заболотных Андрей Александрович, безусловно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.10 - физика полупроводников.**

Доклад А.А. Заболотных по материалам диссертации был заслушан на семинаре лаборатории Неравновесных электронных процессов ИФТТ 26 апреля 2018 г., присутствовало 35 сотрудников, в том числе 5 докторов и 20 кандидатов физико-математических наук - специалистов по теме диссертации. Отзыв обсуждён и одобрен на заседании учёного совета от 14 мая 2018 года.

Отзыв подготовили:



Кукушкин Игорь Владимирович,
доктор физико-математических наук,
академик РАН, главный научный сотрудник
ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2,
номер телефона: 8 903 7788175
e-mail: kukush1@mail.ru

Муравьев Вячеслав Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник



ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д.2,
номер телефона: 8 926 5781269
e-mail: muravev_vm@mail.ru

ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д.2,
номер телефона: 8 (496) 52 219-82
сайт: <http://www.issp.ac.ru>