

ОТЗЫВ НАУЧНОГО ОППОНЕНТА

Муравьева Вячеслава Михайловича

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

Актуальность

Диссертационная работа Д.А. Родионова посвящена исследованию влияния электромагнитного запаздывания на плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах, а также отклику таких систем на микроволновое излучение. Развитие технологий позволило создавать высококачественные двумерные структуры практически любой формы с заданными параметрами, в том числе больших (сантиметровых) латеральных размеров, что позволило экспериментально изучать плазменные колебания в режиме сильного электромагнитного запаздывания, когда длина волны возбуждающего электромагнитного излучения сравнима с размером системы, т.е. с длиной волны плазмонов. Понимание динамики плазменных колебаний в двумерных системах помогает раскрыть фундаментальные физические процессы, связанные с коллективными взаимодействиями электронов, и в перспективе может улучшить характеристик электронных и оптоэлектронных устройств. Плазменные колебания в таких системах обладают высокой частотой и могут использоваться для создания эффективных источников и детекторов электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне, что важно для коммуникаций, медицины и безопасности. Поэтому **актуальность работы не вызывает сомнений.**

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, четырёх приложений и списка литературы, который содержит 111 ссылок, включая 23 ссылки на работы диссертанта. Диссертация изложена на 96 страницах. Содержание и результаты работы достаточно полно отражены в автореферате.

В **введении** приведена актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, указана научная и практическая новизна и значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В **обзоре литературы** обсуждаются известные результаты о плазменных колебаниях в различных двумерных электронных системах, которые являются вспомогательными для изложения основной части диссертации. Так приводятся свойства плазменных колебаний в бесконечных (латерально неограниченных) изотропных ДЭС, в дисках в квазистатическом пределе, а так же кратко представлена информация о краевых магнитоплазмонах.

В **первой главе** с использованием уравнений Максвелла и локального закона Ома выводится уравнение на плотность тока в двумерной электронной системе в форме диска с динамической проводимостью в модели Друде. Вблизи диска расположена металлическая идеально проводящая пластина. Это уравнение является вспомогательным для получения результатов второй и третьей глав. Также произведен переход к удобным безразмерным величинам, в частности, к параметру запаздывания, описывающему роль электромагнитного

запаздывания. Представлен метод анализа свойств плазменных резонансов в спектре поглощения внешнего электромагнитного излучения в диске.

Во второй главе изучены осесимметричная и фундаментальная плазменные моды в диске в отсутствие металлического затвора. Установлено, что частота плазменных колебаний в такой системе может быть оценена феноменологическим «квантованием» волнового вектора в дисперсии плазмонов в бесконечной системе. Показано, что из-за электромагнитного запаздывания ширина плазменных резонансов может быть как больше, так и меньше уширения, связанного с рассеянием носителей на примесях. При малом параметре запаздывания найдены выражения для аппроксимации частоты и ширины резонансов

В третьей главе обсуждается влияние металла на свойства плазменных резонансов. Показано, что при слабом запаздывании частота плазменных колебаний почти не меняется при расстояниях между металлом и диском больших, чем радиус диска. При этом в ширине плазменных резонансов возникает осцилляция относительно значения ширины, соответствующего отсутствию металла. При малом параметре запаздывания получены аналитические аппроксимации положения и ширины плазменных резонансов, а в пределе сильного экранирования задача решена точно.

Четвертая глава посвящена исследованию плазменных колебаний в латерально ограниченных анизотропных двумерных электронных системах. Рассматривается полоса электронного газа, обладающего эллиптической поверхностью Ферми и расположенного на тонкой диэлектрической подложке с задним металлическим затвором. Динамическая проводимость системы рассмотрена в рамках анизотропной модели Друде. Найдены аналитические выражения как для магнитодисперсии, т.е. зависимости частоты от магнитного поля, так и для темпа затухания плазменных колебаний всех магнитоплазменных колебаний в полосе. Оказалось, что частота краевого магнитоплазмона, являющегося фундаментальной модой, не зависит от магнитного поля, а его длина локализации обратно пропорциональна величине магнитного поля. Квадрат частоты остальных мод определяется как сумма квадрата частоты плазмона без магнитного поля и квадрата циклотронной частоты, умноженной на независящий от ориентации поверхности Ферми коэффициент, который уменьшается с ростом роли электромагнитного запаздывания.

В заключении автор кратко приводит основные результаты его работы.

Вместе с тем к работе имеются следующие замечания и вопросы.

Замечания

1. Обзор литературы диссертации практически не содержит ссылки на экспериментальные работы и картинки из них. Я считаю, что такой отрыв теории от эксперимента является существенным недостатком и неоднократно встречается на протяжении всей диссертации.

Те же ссылки на эксперименты, которые имеются часто не отражают историческую ретроспективу тематики. Например, на странице 10, где обсуждается открытие плазмонов в двумерных системах даётся две ссылки на экспериментальные работы открытия двумерных плазмонов в двумерных системах на базе жидкого гелия (Physical Review Letters.—1976.—Vol. 36, no. 3.—P. 145.) и кремниевых МОП транзисторов (Solid State Communications.—1977.—Vol. 24, no. 4.—P. 273–277.). Однако, отсутствует ссылка на основополагающую

экспериментальную работу по обнаружению двумерных плазмонов в кремниевых МОП транзисторах с решётчатым затвором в Bell Labs (S. J. Allen, Jr., D. C. Tsui, and R. A. Logan, Phys. Rev. Lett. 38, 980 (1977)).

2. На странице 16 в главе 3 Введения «Краевой магнитоплазмон» автор диссертации не приводит конкретной формулы для магнитодисперсии краевой магнитоплазменной моды (КМП). Считаю, что это не совсем правильно. Особенно с учётом того, что эта формула была впервые в мире получена в группе автора диссертации - В.А. Волковым и С.А. Михайловым. Вместе с уникальным теоретическим подходом для её получения данная формула, безусловно, составляет гордость отечественной теоретической физики.

3. Мне кажется неправильным, что в Главе 2 (Плазменные колебания в «неэкранированной» изотропной ДЭС в форме диска) вначале обсуждается осесимметричная «тёмная» плазменная мода (рис. 2.2-2.3-2.4) и только в конце Главы несколько страниц посвящены фундаментальной «светлой» плазменной моде (рис. 2.5-2.6). В эксперименте «тёмные» плазменные моды практически никогда не наблюдаются, поэтому их физические свойства не так важны как свойства «светлых» мод, обладающих дипольным моментом. Замечу, что в автореферате диссертации результаты по фундаментальной плазменной моде вообще не обсуждаются.

4. Глава 2 посвящена исследованию того как запаздывание влияет на частоту и ширину линии фундаментального и осесимметричного плазменных мод. В Главе не приведено сравнение полученных теоретических результатов с имеющимися обширными экспериментальными данными (см. например, Phys. Rev. Lett. 121, 176804 (2018) и Письма в ЖЭТФ, том 109, вып. 10, с. 685 – 688 (2019)). Критерием истинности теории является эксперимент. Без сравнения с экспериментом теоретические результаты этой Главы нельзя считать полными и завершёнными.

5. На странице 13 диссертации приведена аналитически точная формула (9) для частоты экранированного плазмона с учётом электромагнитного запаздывания для изотропного спектра электронов. В ней член $(1 + \epsilon v^2/c^2)$ стоит всегда в знаменателе выражений для частоты и затухания. В полученной автором диссертации формуле (4.11), если рассмотреть предельный случай $v_1=v_2$, то для затухания появляется множитель $(1 - \epsilon v^2/c^2)$. Получается, что формулы (9) и (4.11) не переходят друг в друга в предельном случае $v_1=v_2$? Тот же вопрос относительно множителя для циклотронной частоты в формуле (4.12) и (4.19).

6. Диссертация не лишена неточностей и опечаток.

- Например, на странице 10 после формулы (2) не поясняется, что обозначает буква d .

- На странице 63 приведено утверждение «Физически это связано с тем, что даже для мод, дисперсия которых проходит выше дисперсии света, при малых расстояниях d излучение ДЭС подавляется излучением, отраженным от металла». Хотелось бы уточнить какие моды (дисперсия которых проходит выше скорости света) имеются в виду?

Приведенные замечания и вопросы ничуть не умаляют ценность полученных результатов и их высокое качество.

Подводя итог, диссертационная работа 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 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

«02» июня 2025 г.



Муравьев Вячеслав Михайлович

Контактная информация:

ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН

Адрес: 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2

Телефон: +7 (916) 540-55-55

e-mail: muravev_vm@mail.ru

Подпись Муравьева В.М. заверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН



к.ф.м.н.
А.Н. Терещенко