

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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.

Диссертационная работа А.А. Заболотных посвящена исследованию влияния электромагнитного запаздывания на плазменные колебания в двумерной электронной системе в магнитном поле и отклику системы на микроволновое излучение. В последние несколько лет, благодаря развитию технологии получения двумерных структур, стало возможным наблюдение плазменных колебаний в системах с латеральным размером порядка 1 мкм и концентрацией $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При таких больших длинах волн плазмонов (длины волн определяются размером структуры) и высокой концентрации электронов необходимо учитывать электромагнитное запаздывание при вычислении спектра и свойств плазменных колебаний.

Также вызывает интерес исследование высокоподвижных двумерных систем, помещённых в магнитное поле и находящихся под действием микроволнового излучения. В таких системах был обнаружен ряд необычных явлений: осцилляции магнитосопротивления, индуцированные микроволновым излучением, состояния с нулевым сопротивлением и др. Теоретические и экспериментальные исследования такого рода систем активно продолжаются и сейчас.

Таким образом актуальность темы диссертации А.А. Заболотных несомненна.

Научная новизна и достоверность. В своей диссертационной работе А.А. Заболотных решил несколько теоретических задач, касающихся коллективного отклика двумерной электронной системы. Им получены спектры плазмонов в магнитном поле при учёте электромагнитного запаздывания в случае диссипативной двумерной электронной системы. Рассмотрено влияние электромагнитного запаздывания на спектр плазмонов, распространяющихся вдоль края двумерной электронной системы. Кроме того, предложен механизм отклика двумерной электронной системы, находящейся во внешнем магнитном поле, на микроволновое излучение с частотой вблизи удвоенной циклотронной частоты.

Диссертация А.А. Заболотных состоит из введения, обзора литературы, трех глав с **новыми оригинальными результатами**, библиографии и приложения. В Обзоре литературы рассмотрены вопросы, посвященные плазменным колебаниям в двумерных

электронных системах, в т.ч. при учёте электромагнитного запаздывания, кратко обсуждаются свойства краевых плазмонов, в конце обзора рассмотрено явление параметрического резонанса.

В первой главе диссертации исследуются спектры плазмон-поляритонов в двумерной электронной системе, помещённой во внешнее магнитное поле, при учёте диссипации. Известно, что в отсутствие магнитного поля плазмон-поляритоны в двумерной электронной системе медленно затухают, если проводимость системы велика по сравнению со скоростью света. В первой главе показано, что если двумерную систему поместить в магнитное поле, то даже при проводимости системы малой по сравнению со скоростью света, плазмон-поляритоны могут медленно затухать. Кроме того, в спектре возможно появление новой ветви плазмон-поляритонов.

Во второй главе исследована дисперсия краевого плазмона при учёте электромагнитного запаздывания. Рассматривается прямолинейная граница двумерной системы, вдоль которой может распространяться краевой плазмон, локализованный около границы. Показано, что если статическая проводимость системы превосходит скорость света, делённую на $2 \rho_i$, то краевой плазмон (вместе с «объёмным») медленно затухает при малых частотах. Проанализировано распределение заряда, тока и потенциала по поперечной координате.

В третьей главе диссертации исследован параметрический резонанс в двумерной электронной системе, помещённой во внешнее магнитное поле и находящейся под действием микроволнового излучения, при этом частота излучения находится вблизи удвоенной циклотронной частоты электронов. Получено, что если электрическое поле, действующее на электроны в системе, имеет достаточно большой градиент, а сама система – достаточно чистая, то возможно развитие параметрического резонанса, при котором происходит экспоненциальное увеличение гидродинамической (дрейфовой) скорости электронов во времени, т.е. в системе возникает неустойчивость. Появление такой неустойчивости может быть возможным механизмом, отвечающим за узкий пик в фотосопротивлении на удвоенной циклотронной частоте, который относительно недавно наблюдался на эксперименте.

Сказанное выше подтверждает **научную новизну результатов**, полученных в диссертации. В аналитических расчетах автор пользуется проверенными методами теоретической физики, поэтому **достоверность** полученных результатов не вызывает сомнения.

Научная и практическая значимость работы также несомненна. Автором получены и проанализированы спектры плазмон-поляритонов в магнитном поле, а также краевых

плазмон-поляритонов. Предложен механизм, дающий возможное объяснение пика на удвоенной циклотронной частоте в фотосопротивлении двумерной электронной системы в магнитном поле.

Полученные результаты могут быть использованы для создания и совершенствования источников и приёмников терагерцового излучения, действие которых основано на возбуждении плазменных волн

Перехожу к критическим замечаниям, возникшим при чтении диссертации.

1) Раздел 1.2 содержит словесное описание полученных формул и соответствующих им кривых. И тех и других достаточно много, поэтому и слов для описания потребовалось много, но, к сожалению, автор не анализирует физический смысл хотя бы наиболее характерных результатов (какие факторы конкурируют друг с другом, что физически означают различные предельные случаи и т.п.). Например, очень интересный результат – наличие точки окончания спектра. В тексте имеется лишь краткое уведомление читателя: «Такие решения мы не рассматриваем». Разумеется, следовало проанализировать, во-первых, чисто математически тип обнаруженной сингулярности, а во-вторых и в главных, ее физический смысл (распад возбуждения, начало сильного затухания или что-то еще?).

2) Не вполне ясны рассуждения автора на стр. 47 о дельта-образном вкладе в концентрацию при пренебрежении давлением электронного газа. Ведь получаемая при этом сингулярность соответствует не заряженной плоскости, а заряженной нити, так что из-за трехмерного (всегда!) характера электрического поля дело не сводится к скачку производной от потенциала, о котором говорится в тексте.

3) Имеются и некоторые небрежности в изложении. Буквально во второй строке Введения переставлены местами предлог и основное слово; на стр. 5 утверждается, что «Взаимодействие.....обычно называют поляритонами». Все-таки само взаимодействие поляритонами не называют (по крайней мере, у нас в СО РАН).

Сделанные замечания не могут изменить общей оценки представленной диссертации, которая является законченной научной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне, и содержит решение актуальных 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.

Диссертационная работа А.А. Заболотных является законченным исследованием и содержит принципиально новые важные результаты. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. А.А. Заболотных безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.10 - физика полупроводников.**

Чаплик Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
специальность - 01.04.10 физика полупроводников,
академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории
теоретической физики ФГБУН Институт физики полупроводников
им. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, пр. Ак.Лаврентьева, 13.
e-mail: chaplik@isp.nsc.ru.

24 апреля 2018 г.




ученый секретарь
ИФП СО РАН
С.А. Аржанникова