

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.

Работа посвящена чрезвычайно интересной тематике, важной как с фундаментальной точки зрения, так и в свете возможных приложений в рамках новой области исследований, бурно развивающейся в последнее десятилетие – плазменной электроники. Интерес к этой тематике обусловлен рядом причин. В первую очередь, это высокая скорость распространения плазменных волн, которая на порядок превышает максимально достижимые дрейфовые скорости электронов. Как следствие, диапазон рабочих частот приборов на основе плазмоники попадает в очень важный для приложений терагерцовый интервал. Во-вторых, скорость двумерных плазмонов можно менять напряжением на затворе, что открывает новые возможности по управлению плазмонными приборами. Наконец, сильная связь плазменных возбуждений с электромагнитным полем дает уникальные возможности излучения и детектирования электромагнитных сигналов, в том числе в терагерцовой области частот. Имеются, однако, и сложности на пути практической реализации приборов плазмоники, главная из которых связана с подавлением плазмонов процессами релаксации импульса. Существенный прорыв в этом направлении произошел в последнее десятилетие, после открытия ряда двумерных систем (таких как графен и структуры на его основе) с чрезвычайно высокой подвижностью. Именно в таких системах плазменные осцилляции можно «раскачать» до значительной амплитуды, а отклик на внешнее возбуждение в системах конечного размера будет содержать острые плазмонные резонансы. Диссертационная работа А.А. Заболотных, посвященная фундаментальным проблемам двумерной плазмоники, написана на пике интереса к данной области и актуальность темы диссертации несомненна.

Научная новизна и достоверность.

Принципиальная новизна работы связана с последовательным рассмотрением эффектов запаздывания электромагнитного излучения в целом ряде двумерных плазмонных систем. В частности, исследованы все возможные типы объемных спектров плазмон-поляритонов в двумерной электронной системе, помещенной в перпендикулярное магнитное поле, и предсказано существование дополнительных ветвей спектра. Также изучено параметрическое возбуждение объемных плазмонов и проанализировано проявление эффектов запаздывания в спектре краевого плазмона.

Диссертация 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 исследованы спектры двумерных плазмон-поляритонов в магнитном поле в двумерной электронной системе с диссипацией. Получен ряд качественно новых результатов. В частности, впервые построена общая «фазовая» диаграмма для спектров магнитоплазмон-поляритонов. Впервые проанализирован спектр плазмонов в

различных областях фазовой диаграммы с учетом процессов затухания. Также изучена модификация спектров при наличии экранирующего затвора.

Вторая глава посвящена детальному анализу влияния запаздывания на спектр краевого плазмона. В этой главе впервые получено аналитическое выражение для спектра краевого плазмон-поляритона. В электростатическом пределе (бесконечная скорость света) оно переходит в известное выражение для краевого магнетоплазмона. Показано, что спектр плазмона существенно зависит от соотношения между $2D$ проводимостью и скоростью света. Также впервые показано, что с увеличением длины волны, добротность краевого плазмон-поляритона возрастает.

В третьей главе изучено оптическое возбуждение двумерной электронной системы, находящейся под действием микроволнового излучения и помещённой в постоянное магнитное поле, перпендикулярное плоскости. Задача инициирована недавними экспериментами по фотовозбуждению двумерного газа. В диссертации впервые предложен и детально исследован простой механизм наблюдающегося в эксперименте узкого пика в фотоотклике на частоте возбуждающего излучения равной удвоенной циклотронной частоте электронов. Впервые показано, что данный пик можно качественно объяснить, предполагая что в системе возникает параметрический резонанс. В работе проанализированы условия возникновения пика и рассмотрены как простейшая, так и приближенная к эксперименту модели параметрического резонанса, в том числе с учетом эффектов экранировки.

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

Результаты, полученные в диссертации, имеют важное фундаментальное значение для развития плазмоники. В частности, автором детально исследован ряд нетривиальных явлений, обусловленных электромагнитным запаздыванием, построена общая «фазовая» диаграмма для спектров магнитоплазмон-поляритонов и проанализирован спектр плазмонов в различных областях фазовой диаграммы с учетом процессов затухания. Результаты имеют важную практическую значимость и могут быть использованы для создания миниатюрных, перестраиваемых источников и детекторов терагерцового излучения.

Замечания.

В процессе изучения диссертационной работы у меня возник ряд вопросов и мелких замечаний:

- 1) В нескольких местах автором предсказано окончание спектров краевого магнетоплазмона без пояснения конкретных физических механизмов, приводящих к обрыву спектра. Например, недостаточно подробно разъяснены причины окончания спектра голубой ветки на рисунке 1.3.
- 2) Также окончание спектра предсказано на рис. 1.6. Как можно понять из этого рисунка, волновым векторам, большим точки окончания спектра, вообще не соответствуют какие-либо возбуждения. Соответственно, не вполне понятно, что произойдет, если в системе задать начальную модуляцию плотности с таким волновым вектором.
- 3) Можно было бы ожидать, что в изучаемых системах должен наблюдаться антикроссинг оптических возбуждений, распространяющихся со скоростью близкой к скорости света и квазистатических плазмонных возмущений. Например, можно было бы ожидать

антикроссинг между ветками 1 и 2 на рисунке 1.3. Также можно было бы ожидать антикроссинга ветвей 1 и 2 на рис. 1.4. На мой взгляд, причины отсутствия такого антикроссинга заслуживают более подробного обсуждения.

4) Представленный на рисунке 2.2 спектр плазмон-поляритона имеет очень высокую добротность при больших волновых векторах. Было бы очень интересно изучить возбуждение соответствующих плазмонных колебаний внешним полем.

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

Подводя итог, следует сказать, что диссертация А.А. Заболотных является законченной научной работой, выполненной на высоком научном уровне, и содержит решение ряда важных задач о свойствах плазмонов в различных двумерных электронных системах. 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 содержит принципиально новые важные результаты, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение. Она 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.**

Качоровский Валентин Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.10 «Физика полупроводников»,
ведущий научный сотрудник сектора теории оптических
и электрических явлений в полупроводниках
ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
14 мая 2018 г.
Тел. +7-921-9941081
e-mail: kachor.valentin@gmail.com

Подпись _____

зав.отделом кадров ФТИ им. А.Ф.Иоффе

удостоверяю

Отдел кадров

