

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе
Муравьева Вячеслава Михайловича
«Релятивистские плазменные волны и новые плазмон-поляритонные эффекты
в двумерных электронных системах»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации. Современная физика конденсированных сред это в первую очередь физика структур пониженной размерности. Среди всевозможных наносистем именно структуры с двумерным электронным газом: квантовые ямы, графен, атомарно-тонкие полупроводники и металлы – занимают особое место. Такие системы сочетают, с одной стороны, необычные оптические и транспортные свойства, отсутствующие в объемных кристаллах, а с другой – благодаря успехам технологии – обладают высоким качеством, что выражается в высокой подвижности носителей заряда, узких резонансах в оптическом отклике, больших временах релаксации импульса и спина носителей заряда.

Двумерные электронные системы особенно интересны коллективными эффектами. Одним из наиболее ярких тому примеров – плазменные возбуждения, или плазмоны – коллективные колебания электронного газа. В двумерных системах они обладают необычной – корневой – дисперсией, которая может перестраиваться при изменении параметров окружения. Спектр плазменных волн несет важную информацию о носителях тока, кулоновском взаимодействии. Плазмоны также находят применение в физике метаматериалов и обладают перспективами для использования в сверхбыстрой электронике.

Диссертация В.М. Муравьева посвящена экспериментальным исследованиям плазмонов в двумерном электронном газе. В работах, составивших основу диссертации, были обнаружены новые типы плазменных возбуждений, исследована их дисперсия, изучены условия возбуждения плазменных резонансов, выявлены особенности взаимодействия плазменных волн со светом. Это определяет высокую актуальность темы диссертации В.М. Муравьева.

Анализ содержания диссертации, новизна и достоверность полученных результатов. Диссертация содержит результаты экспериментальных исследований коллективных плазменных и плазмон-поляритонных возбуждений в низкоразмерных электронных системах, главным образом в квантовых ямах.

Диссертационная работа В.М. Муравьева состоит из *введения*, где приводится мотивация исследований и выбора темы диссертации, обосновывается ее актуальность, сформулированы цели и результаты работы, а также положения, выносимые на защиту, литературного обзора (*глава 1*), *главы 2* с описанием образцов и экспериментальных методик, в том числе разработанных автором диссертации, *семи глав*, содержащих новые и оригинальные научные результаты, *заключения*, где сформулированы основные результаты и выводы диссертации, и *библиографии*.

Первые две главы диссертации носят в основном обзорный характер, они помогают читателю ориентироваться в изложенном материале, а изложение материала выполнено с педагогическим мастерством.

Третья глава диссертационной работы посвящена обнаружению и изучению физических свойств нового семейства коллективных плазменных возбуждений в двумерной электронной системе — «проксимити» плазмонов. Автор обнаружил, что в гибридной системе, состоящей из двумерного электронного газа в квантовой яме, частично экранированного металлическим затвором (полоской), возбуждается новый тип плазменных волн. Исследованы свойства проксимити плазмонов, подтвержден их

необычный закон дисперсии $\omega \sim \sqrt{\hbar q}$, где q – волновой вектор плазмона вдоль затвора, \hbar – расстояние между двумерным электронным газом и затвором. Изучена магнитодисперсия проксимити плазмонов. Обнаружены возбужденные состояния такого плазмона. Приведен анализ причин, которые не позволили наблюдать такие плазмоны в работах предшественников, и указана методика и геометрия эксперимента, позволившая обнаружить проксимити плазмоны.

В *четвертой главе* диссертации В.М. Муравьева исследуются физические особенности взаимодействия двумерной плазмы со светом. При достаточно малых волновых векторах плазмона, или когда длина волны электромагнитного излучения оказывается сравнимой с размером образца, взаимодействие распространяющегося электромагнитного поля с двумерными плазменными возбуждениями становится особенно сильным. При этом необходимо учитывать эффекты запаздывания, и «хорошими» квазичастицами являются двумерные плазменные поляритоны. Автор вводит безразмерный параметр A , равный отношению плазменной частоты при данном волновом векторе к частоте света на том же q , который иллюстрирует роль эффектов запаздывания. Еще одним следствием связи коллективных возбуждений электронной системы со светом является вклад в затухание плазмонов, связанный с излучением. Характерное «радиационное» уширение плазменных резонансов определяется по порядку величины как $n_s e^2 / mc^2$, где n_s – концентрация двумерных носителей заряда, m – их эффективная масса. Поэтому радиационное затухание может вносить заметный вклад в уширение плазменных резонансов лишь в структурах с высокой подвижностью заряда, где отношение $2\pi\sigma_{2D}/c$ (σ_{2D} – проводимость двумерного электронного газа) достаточно велико. Наличие образцов высокого качества и оригинальные экспериментальные методики позволили автору наблюдать двумерные плазмон-поляритоны на низких частотах, обнаружить и изучить их необычную магнитодисперсию [зависимости $\omega(B)$], а также наблюдать радиационное затухание плазменных резонансов.

Пятая глава посвящена обнаружению и исследованию еще одного нового плазменного возбуждения – релятивистского плазмона, наблюдаемого в условиях сильного запаздывания. Такие плазмоны возбуждаются на сверхнизких частотах, включая частоты, сопоставимые с обратным временем рассеяния электронов, если $2\pi\sigma_{2D}/c \gg 1$. Удивительным обстоятельством является тот факт, что ширина обнаруженного релятивистского значительно меньше обратного времени релаксации электронов. Установлены условия возбуждения релятивистских плазмонов: они возбуждаются только тогда, когда затвор электрически связан с двумерным электронным газом.

Глава 6 диссертации В.М. Муравьева содержит результаты исследования плазмонов в многодолинных двумерных электронных системах на основе квантовых ям AlAs. При этом сильная анизотропия эффективных масс двумерных электронов и контролируемое заполнение долин носителями заряда делают гетероструктуры на основе таких квантовых ям уникальным объектом для изучения новых плазменных явлений. Обнаружена щель в магнитодисперсии плазмонов в пределе $B \rightarrow 0$, связанная с анизотропией эффективных масс электронов в X-долинах AlAs. Это позволило диссертанту, по-видимому, впервые в мире точно определить эффективные массы электронов в такой гетероструктуре. В этой же главе сообщается о ряде интересных эффектов, возникающих в физике плазмонов в многодолинном полупроводнике в условиях дисбаланса долиной заселенности, а также при наличии упругих деформаций.

В *седьмой главе* приводятся результаты экспериментального исследования так называемых «акустических» (т. е. обладающих линейным законом дисперсии) краевых магнитоплазменных возбуждений в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. Благодаря специально разработанной технологии получения электронных систем с широким профилем краевого обеднения удалось существенно облегчить возбуждение и детектирование краевых магнитоплазменных мод и однозначно установить наличие акустических мод в полупроводниковых двумерных электронных системах. Обнаружено,

что в режиме целочисленного квантового эффекта Холла количество наблюдаемых мод оказывается равным числу полностью заполненных уровней Ландау в объеме образца. При этом j -ая акустическая краевая мода при подходе к фактору заполнения $\nu = 2j$ исчезает. Также автор обнаружил «спиновые» краевые моды, связанные с наличием зеемановских щелей в спектре квантовохолловской системы и определить условия их возникновения.

В *главе 8* диссертации приводятся результаты экспериментов по обнаружению и исследованию «темных» осесимметричных плазменных возбуждений в одиночных дисках в двумерной электронной системе. Такие моды обладают нулевым дипольным моментом, поэтому их взаимодействие с электромагнитным полем ослаблено. В.М. Муравьев разработал методику, позволяющую на основе ближнеполевых эффектов возбуждать такие моды и изучать их поведение в магнитном поле. Экспериментально подтверждено, что гибридизация этих возбуждений со светом во много раз меньше, чем гибридизация дипольно активных двумерных плазмонов, а в магнитном поле наблюдаются пересечения магнитодисперсий «светлых» и «темных» плазмон-поляритонных мод.

Последняя, девятая глава диссертационной работы содержит результаты исследований дисперсии плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах с близко расположенным задним и латеральным затвором, когда в теории ожидается зависимость $\omega \sim n_s^{1/2} q$. Проведено детальное сопоставление известных теоретических представлений о дисперсии таких экранированных плазмонов с данными эксперимента. В этой же главе приведены интересные результаты по интерференции плазмонов, а также исследована роль дополнительной экранировки плазмонов боковыми металлическими электродами.

Сказанное выше подтверждает новизну результатов, полученных в диссертационной работе.

Достоверность основных полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Автор использует широкий диапазон современных экспериментальных методик, причем оригинальные методы экспериментов в достаточной мере апробированы. Во многих случаях выполнено сравнение результатов экспериментов с теоретическими предсказаниями. В пользу высокой достоверности результатов свидетельствует их внутренняя непротиворечивость, а также широкая апробация результатов диссертации на научных семинарах и конференциях.

Научная и практическая значимость определяется полученными новыми экспериментальными результатами, включая обнаружение новых типов коллективных возбуждений в двумерных полупроводниках. Экспериментальные результаты дают информацию о физических свойствах различных волн, распространяющихся в двумерных электронных системах. Они открывают новые применения плазмонов в области терагерцовой электроники, спин- и долинтроники. Практическая значимость исследований подтверждается также наличием патентов РФ.

Диссертационная работа В.М. Муравьева, однако, не свободна от недостатков, при ее чтении и обсуждении возникают следующие замечания:

1. Имеется замечание по рис. 3.2 и утверждению «Видно, что экспериментальные данные полностью подтверждают предсказанный теорией корневой закон дисперсии» («проксимити» плазмона). На рисунке отклонение от линейности мало, а погрешности в определении частот не указаны. Кроме того, в следующей главе изучаются радиационные поправки, которые меняют дисперсию плазмонов при малых волновых векторах q , ср. с рис. 4.2. Соответствующее утверждение в тексте диссертации можно было бы смягчить или привести дополнительные аргументы в его пользу. Аналогичное замечание относится и к рис. 3.4 и соответствующей дискуссии.
2. Утверждение про гигантскую перенормировку эффективной массы в разд. 4.3 является интересным, однако, судя по всему, величина $m' = m^*(1 + V_p^2/c^2)$ входит только в дисперсию плазмона. По крайней мере, из текста диссертации неясно,

проявятся ли m' , например, в осцилляциях Шубникова-де-Гааза или в какие-либо другие наблюдаемые?

3. Проявляются ли эффекты смешивания долин на интерфейсах квантовой ямы [Y. Fu, M. Willander, E. L. Ivchenko, and A. A. Kiselev. Valley mixing in GaAs/AlAs multilayer structures in the effective-mass method. Phys. Rev. B 47, 13498 (1993)] в плазменных колебаниях?

В значительной мере эти замечания, однако, носят формальный характер, они подчеркивают масштабность экспериментальных исследований и демонстрируют, что работы автора обладают широкой перспективой для дальнейшего развития. Они не умаляют общей высокой оценки диссертационной работы В.М. Муравьева.

Диссертация Вячеслава Михайловича Муравьева является завершенной научной работой, выполненной на высоком научном уровне. В диссертации обнаружены и экспериментально исследованы новые типы плазменных колебаний в двумерных электронных системах. Материалы диссертации опубликованы в авторитетных физических журналах (Physical Review Letters и Physical Review B, Applied Physics Letters и Journal of Applied Physics, Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, УФН), докладывались автором на тематических конференциях и семинарах. Ряд важных для практических применений результатов запатентован. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

По моему мнению, по актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа В.М. Муравьева «Релятивистские плазменные волны и новые плазмон-поляритонные эффекты в двумерных электронных системах» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), а ее автор, Муравьев Вячеслав Михайлович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 - физика полупроводников),
член-корреспондент РАН
Глазов Михаил Михайлович
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.
Тел.: + 7 911 913 04 36
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Согласен на передачу персональных данных.  Глазов Михаил Михайлович

Подпись М.М. Глазова удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ РАН,
кандидат физико-математических наук,
Патров М.И.

« 28 » сентября 2021 года

