

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Ивана Владимировича Андреева «Высокочастотная проводимость и коллективные эффекты в двумерных электронных системах», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Исследование микроволнового отклика двумерных электронных систем (ДЭС) является важной областью современной физики конденсированного состояния. Эта тематика представляет интерес как с фундаментальной точки зрения, поскольку ДЭС является гибким и удобным модельным объектом, свойства которого легко перестраивать, так и с прикладной точки зрения, например, для создания элементов электроники нового поколения. Андреев И. В. в своей диссертации экспериментально исследует три проблемы, важные для развития современной физики ДЭС:

- Наблюдение и установление свойств акустических краевых магнитоплазмонов (АКМП) в ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. АКМП – мультипольные возбуждения со сложным пространственным распределением заряда, что усложняет их возбуждение и наблюдение, поэтому данные об их свойствах на настоящий момент крайне скудны. Вместе с тем, АКМП представляют значительный интерес как инструмент исследования структуры края ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.
- Реализация плазмон-поляритонной системы с перестраиваемой ультрасильной связью в копланарных микрорезонаторах. Такая система может представлять интерес для экспериментального наблюдения различных эффектов квантовой электродинамики в резонаторе.
- Наблюдение и исследование бесконтактным способом СВЧ-индуцированных осцилляций в высокочастотной магнитопроводимости ДЭС, что важно для установления конкретного микроскопического механизма СВЧ-индуцированных осцилляций магнитосопротивления.

Поэтому **актуальность** диссертации Андреева И. В. не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулирована цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о научной и практической значимости работы, её апробации, личном вкладе автора, публикациях по теме диссертации, объёме и структуре работы.

В **первой главе** приводится обзор современной научной литературы по теме диссертации. Обсуждаются свойства магнитоплазмонов, краевых магнитоплазмонов и акустических краевых магнитоплазмонов в двумерных электронных системах. Дан подробный обзор свойств СВЧ-индуцированных осцилляций магнитосопротивления двумерных электронных систем. Также рассматриваются плазмон-поляритонные эффекты в ДЭС.

Вторая глава содержит описание технологии изготовления образцов и экспериментальной методики. Диссертация выполнена на образцах, изготовленных из высококачественных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. И. В. Андреевым использовалась микрополосковая методика, которая сводится к измерению пропускания копланарного волновода, расположенного над двумерной электронной системой. По ослаблению сигнала пропускания можно определять проводимость ДЭС на частоте измерительного сигнала и детектировать резонансы микроволнового поглощения в ДЭС.

В третьей главе исследуются акустические краевые магнитоплазмоны (АКМП) в ДЭС в режиме квантового эффекта Холла. Для того, чтобы облегчить возбуждение и наблюдение этих мультипольных возбуждений в ДЭС, диссертантом была разработана особая методика неглубокого травления образцов, позволяющая получать ДЭС с рекордно большими ширинами области краевого обеднения вплоть до 10 мкм. В образцах в виде дисков ДЭС, расположенных в щелях копланарного волновода, удалось обнаружить и исследовать АКМП в режиме целочисленного квантового эффекта Холла в широком диапазоне магнитных полей и факторов заполнения. Диссертантом доказано, что размер области краевого обеднения оказывает сильное влияние на амплитуду АКМП резонансов – чем шире область краевого обеднения, тем резонансы более выражены. И.В. Андреевым был получен интересный и важный физический результат, заключающийся в том, что число АКМП мод на краю ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла определяется топологической структурой края, и равно числу несжимаемых полосок, существующих на краю ДЭС. Сначала описывается поведение АКМП мод, связанных с циклотронными щелями в спектре системы. При понижении температуры Андреевым И.В. была обнаружена дополнительная АКМП мода, связанная с открытием энергетической щели между спиновыми подуровнями нижайшего уровня Ландау. Также автором подробно описаны дисперсия и магнитодисперсия АКМП возбуждений в ДЭС, и исследована зависимость амплитуды АКМП от фактора заполнения уровней Ландау. Так, например, оказалось, что 1-я АКМП мода имеет максимум амплитуды на факторе заполнения 3.

Четвёртая глава посвящена исследованию плазмон-поляритонных возбуждений в копланарных микрорезонаторах. В экспериментах исследовались резонансы пропускания копланарного микрорезонатора, литографически сформированного на поверхности образца над ДЭС. Было обнаружено семейство резонансов, отвечающих гибридизации собственных мод копланарного микрорезонатора и плазменных возбуждений в ДЭС. Показано, что в такой системе реализуется режим ультрасильной плазмон-фотонной связи, причём константой связи мод можно управлять, например, изменяя электронную концентрацию в образце.

В пятой главе обсуждаются СВЧ-индуцированные осцилляции, измеренные в высокочастотной магнитопроводимости двумерных электронных систем. Для этого измерялось пропускание копланарного волновода на поверхности образца на частотах измерительного сигнала до 10 ГГц, при этом образец одновременно облучался СВЧ-излучением в диапазоне 40-140 ГГц. Из измерений пропускания копланарного волновода возможно однозначно определить действительную часть высокочастотной проводимости образца. Диссертантом было показано, что СВЧ-индуцированные осцилляции наблюдаются в высокочастотной проводимости ДЭС на частотах измерительного сигнала до 10 ГГц, причем их амплитуда падает приблизительно экспоненциально с ростом частоты измерительного сигнала.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты, полученные в диссертации И.В. Андреева, получены впервые и дают новые сведения, важные для решения актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Поэтому они являются **новыми и научно значимыми**.

Например, диссертантом показано, что число акустических краевых магнитоплазменных мод в ДЭС определяется структурой края в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. Этот результат делает АКМП перспективным инструментом для исследования краевых состояний систем в режиме квантового эффекта Холла.

В диссертации обнаружен и охарактеризован новый тип плазмон-поляритонных возбуждений с ультрасильной и перестраиваемой связью. Такая система представляет интерес для новых экспериментов в области квантовой электродинамики в резонаторе. Также диссертантом показано, что СВЧ-индуцированные осцилляции могут наблюдаться в измеренной бесконтактным способом высокочастотной проводимости ДЭС и изучен характер их затухания с ростом частоты измерительного сигнала. Результаты могут мотивировать теоретиков установить, наконец, микроскопический механизм СВЧ-индуцированных осцилляций магнитосопротивления. Выводы диссертационной работы следует считать **достоверными и обоснованными** на основании их широкой экспериментальной проверки.

Диссертация написана ясно, последовательно и подробно. Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на российских и международных конференциях и семинарах и хорошо известны среди специалистов. Цели, поставленные в диссертации достигнуты полностью, все запланированные задачи решены. Диссертация является законченным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. **Автореферат** полно и правильно передаёт содержание диссертации.

Тем не менее, текст диссертации вызывает ряд вопросов.

Одно из главных достижений диссертанта связано с исследованием акустических ветвей краевых магнитоплазмонов (АКМП). Так, были обнаружены АКМП на факторе заполнения уровней Ландау, равном 1, что отвечает полной спиновой поляризации системы. Как эта особенность системы проявилась на опыте? Что происходит с АКМП в режиме дробного КЭХ?

Далее. Интерпретация результатов связана с несжимаемыми и сжимаемыми полосками квантово-холловской жидкости на краю образца. Как экспериментально установлено, что это именно полоски, а не просто краевые каналы проводимости? Наблюдалось ли какие-нибудь проявления АКМП при разрушении этих полосок?

Далее. Выводы касаются свойств плазмонов в единичном 2D диске. Однако в работе измерялись свойства массива дисков. Как экспериментально доказывается отсутствие взаимодействия между ними? Согласуется ли это с предсказаниями теории?

Указанные вопросы имеют уточняющий характер. Они не имеют принципиального значения и не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация И. В. Андреева выполнена на очень высоком уровне и представляет несомненный физический интерес.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что диссертационная работа Андреева Ивана Владимировича «Высокочастотная проводимость и коллективные эффекты в двумерных электронных системах» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современной физики конденсированного состояния тему. Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Андреев Иван Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», главный научный сотрудник Лаборатории методов получения тонких пленок и пленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Волков Владимир Александрович

«22» декабря 2020 года

Согласен на обработку персональных данных.

Волков В. А.

«22» декабря 2020 года

Подпись Волкова В.А. заверяю.

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

к.ф.-м.н.



Чусов И. И.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 125009, Россия, Москва, ул. Моховая д. 11 к. 7

Телефон: +7(495)629-35-74

e-mail: vova@mail.cplire.ru