

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Андреева Ивана Владимировича «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».

В диссертации Андреева И. В. рассматриваются три актуальные физические задачи в области свойств двумерных электронных систем (ДЭС) в полупроводниковых гетероструктурах в микроволновом диапазоне частот. Одна из задач связана с исследованием акустических краевых магнитоплазмонов (АКМП) – краевых волн зарядовой плотности со сложным мультипольным распределением заряда. Экспериментальные данные о таких возбуждениях крайне скудны, вместе с тем они представляют интерес как инструмент исследования свойств края системы в режиме квантового эффекта Холла. Другая задача связана с реализацией и исследованием плазмон-поляритонной системы с управляемой ультрасильной связью, что представляет интерес для исследования неадиабатических эффектов квантовой электродинамики. Третья задача связана с исследованием СВЧ-индуцированных осцилляций в высокочастотной магнитопроводимости ДЭС. Данное явление до сих пор не получило полного теоретического объяснения, и привлекает интерес широкого круга исследователей. Исходя из сказанного, **актуальность** диссертации Андреева И. В. не вызывает сомнения.

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

Во **введении** обоснована актуальность поставленных задач, сформулирована цель работы, перечислены основные результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту. Также во введении обсуждается научная и практическая значимость работы, даются сведения о публикации результатов, составляющих содержание диссертации, докладах по теме работы на российских и международных конференциях и семинарах, сформулирован личный вклад автора в работу.

Первая глава диссертации содержит обзор актуальной научной литературы по изучаемым проблемам. В начале главы приведены общие сведения о свойствах магнитоплазмонов и краевых магнитоплазмонов в ДЭС. Далее даётся подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвящённых АКМП в ДЭС. Затем приводятся сведения о эффектах плазмон-фотонного взаимодействия (релятивистские эффекты запаздывания, поляритоны в микрорезонаторах) для двумерных плазмонов. Последний раздел первой главы посвящён обзору работ по СВЧ-индуцированным осцилляциям магнитосопротивления ДЭС.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных образцов и методик. В диссертации использовались образцы, изготовленные из высококачественных полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. Методическое единство диссертации обеспечивается использованием копланарно-трансмиссионной методики, которая позволяет измерять высокочастотную проводимость и детектировать резонансы микроволнового поглощения в ДЭС.

Третья глава посвящена исследованию АКМП в ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла. Для этого Андреевым И. В. была разработана специальная методика неглубокого травления образцов, позволяющая увеличить размер области краевого обеднения ДЭС. За счёт этого автору удалось упростить возбуждение АКМП и впервые успешно пронаблюдать их в широком диапазоне факторов заполнения. Автором

получен важный качественный результат, состоящий в том, что число АКМП мод в системе определяется структурой её края, а именно, равно числу т. н. несжимаемых полосок, возникающих на краю ДЭС в режиме квантового эффекта Холла. При понижении температуры системы до 0.5 К Андрееву И. В. удалось наблюдать появление дополнительных АКМП мод, связанных с открытием спиновых щелей в энергетическом спектре системы. Автором подробно исследована магнитодисперсия и дисперсия АКМП мод, а также изучена зависимость амплитуды мод от фактора заполнения и от глубины травления. Показано, что размер области краевого обеднения ДЭС оказывает определяющее влияние на возможность наблюдения АКМП.

В **четвёртой главе** исследуются плазмонные поляритоны в копланарных микрорезонаторах. Для этого Андреевым И. В. были исследованы образцы, в которых копланарный микрорезонатор (в виде отрезка копланарного волновода) был литографически сформирован на поверхности образца над ДЭС. В таких образцах автору удалось успешно пронаблюдать явление гибридизации собственных мод копланарного микрорезонатора с плазменными возбуждениями в ДЭС, причем был реализован режим ультрасильной связи между модами. Автором показано, что константу связи мод можно перестраивать, изменяя концентрацию электронов в образце.

В **пятой главе** обсуждаются СВЧ-индуцированные осцилляции высокочастотной проводимости ДЭС. Для их исследования образец одновременно облучался СВЧ-излучением в диапазоне 40-140 ГГц и бесконтактной методикой измерялась его проводимость в микроволновом диапазоне. Автору удалось пронаблюдать СВЧ-индуцированные осцилляции высокочастотной проводимости ДЭС на частотах измерительного сигнала до 10 ГГц и исследовать зависимость их амплитуды от частоты измерительного сигнала.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Показано, что в режиме целочисленного квантового эффекта Холла число акустических магнитоплазменных мод в ДЭС равно числу несжимаемых полосок, возникающих на краю системы, причём при понижении температуры могут возникать дополнительные моды, связанные со спиновыми щелями в энергетическом спектре системы.
2. Подробно исследована магнитодисперсия АКМП мод в широком диапазоне магнитных полей и факторов заполнения. Также исследована их дисперсия и зависимость амплитуды мод от фактора заполнения и от глубины травления экспериментальных образцов. Показано, что именно размер области краевого обеднения ДЭС оказывает определяющее влияние на возможность наблюдения АКМП.
3. Реализован режим ультрасильной перестраиваемой связи между плазмонными возбуждениями в ДЭС и собственными модами копланарного микрорезонатора.
4. Показано, что СВЧ-индуцированные осцилляции могут наблюдаться в высокочастотной проводимости двумерных систем в широком диапазоне частот измерительного сигнала (до 10 ГГц), причём их амплитуда падает с ростом частоты измерительного сигнала.

Полученные результаты являются новыми и научно значимыми, так как они получены впервые и дают новые научные знания о свойствах ДЭС в микроволновом диапазоне частот. Так, Андреевым И. В. впервые экспериментально обнаружено, что число АКМП мод в ДЭС в режиме целочисленного квантового эффекта Холла определяется структурой её края, а именно равно числу имеющихся на краю системы несжимаемых полосок. Автору удалось реализовать новую систему с режимом перестраиваемой ультрасильной связи между плазмонами и фотонными модами копланарного микрорезонатора, что открывает перспективу для исследования неадиабатических эффектов квантовой электродинамики. Также автором показано, что СВЧ-индуцированные осцилляции магнитосопротивления наблюдаются на гигагерцовых частотах измерительного сигнала, и впервые исследована динамика изменения их амплитуды с ростом частоты измерительного сигнала. Этот новый результат может иметь значение для установления механизма СВЧ-индуцированных осцилляций магнитосопротивления.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **корректными и обоснованными** в силу их всесторонней экспериментальной проверки. Также необходимо отметить хорошее согласие результатов эксперимента с теорией в тех случаях, когда такая теория существует. Материал, представленный в диссертации, изложен ясно и последовательно. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, были представлены на российских и международных конференциях и семинарах. Цели и задачи, поставленные в работе, полностью осуществлены. **Автореферат** правильно и полно передаёт содержание диссертации.

Вместе с тем, к диссертации имеется ряд замечаний, которые состоят в следующем:

1. Из описания копланарно-трансмиссионной методики измерений (разделы 2.3, 2.4 диссертации) не вполне понятно, учитывалось ли влияние возможных отражений сигнала на стыках участков измерительного тракта на функцию пропускания такой системы.
2. Из описания методики неглубокого травления (раздел 3.2 диссертации) не понятно, проверялось ли в эксперименте, что при неглубоком травлении электронная плотность между дисками ДЭС обращается в нуль.
3. В разделе 5.3 диссертации приведены зависимости амплитуды СВЧ-индуцированных осцилляций высокочастотной проводимости ДЭС от частоты измерительного сигнала для двух частот СВЧ-облучения: 54 и 80 ГГц. Исследовались ли аналогичные зависимости для других частот СВЧ-облучения образца? Имеется ли влияние частоты СВЧ-облучения на характер данных зависимостей?

Перечисленные выше замечания носят рекомендательный характер и никоим образом не снижают общей высокой оценки работы. Диссертационная работа Андреева Ивана Владимировича «Высокочастотная проводимость и коллективные эффекты в двумерных электронных системах» является законченным научным исследованием и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор Андреев Иван Владимирович вне всякого сомнения заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», ведущий научный сотрудник Лаборатории физики низкоразмерных электронных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН)

Быков Алексей Александрович

«24» 12 2020 года

Быков

Согласен на обработку персональных данных

Быков А. А.

«24» 12 2020 года

Быков

Подпись Быкова А. А. заверяю

Заместитель директора
по научно-организационной работе
ИФП СО РАН
к.ф.-м.н.



Каламейцев

Каламейцев А. В.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13

Телефон: +7(383)330-67-33

e-mail: bykov@isp.nsc.ru