

Отзыв официального оппонента о диссертационной работе

Муравьева Вячеслава Михайловича

«Релятивистские плазменные волны и новые плазмон-поляритонные эффекты в двумерных электронных системах»

представленный на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Главным предметом физики низкоразмерных электронных систем является изучение характерных для них одночастичных и коллективных элементарных возбуждений. Одним из основных типов коллективных возбуждений двумерной электронной системы (ДЭС) является волна зарядовой плотности – плазмон. Плазменные возбуждения в двумерных электронных системах интенсивно изучаются уже более полувека. Отчасти такой интерес связан с множеством уникальных свойств, отличающих двумерные плазмоны от их трёхмерных аналогов. Исследования свойств плазменных возбуждений в ряде случаев необходимо для выявления микроскопического механизма и физической природы коллективных явлений в более общем смысле термина. Такие исследования были выполнены в диссертационной работе Муравьева В.М., а полученные результаты обуславливают ее высокую **актуальность**.

Новизна результатов, вошедших в диссертацию, состоит в экспериментальном открытии и всестороннем исследовании целого ряда новых плазменных возбуждений в двумерных электронных системах: плазмонов в частично экранированных ДЭС, релятивистских плазмонов, краевых акустических плазмонов, плазмонов в ДЭС с сильно анизотропным энергетическим спектром. Получение такого широкого спектра новых научных результатов стало возможным благодаря применению оригинальной оптической методики детектирования плазменных резонансов. Данная методика имеет значительные преимущества, так как. Будучи неинвазивной, не требует для своей реализации нанесения на поверхность образца вспомогательных электродов, наличие которых неизбежно приводит к модификации свойств плазмонов. Результаты, описанные в диссертации Муравьева В.М., получены впервые, являются **новыми и научно значимыми** для решения актуальных задач современной физики конденсированного состояния.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **достоверными и обоснованными** в силу их всесторонней экспериментальной проверки. Важно отметить хорошее согласие результатов эксперимента с теорией. Материал, представленный в диссертации, изложен ясно и последовательно. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, были представлены на российских конференциях и семинарах, а также на авторитетных международных конференциях. Цели и задачи, поставленные в работе, полностью осуществлены. Автореферат правильно и полно передаёт содержание диссертации.

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

Во **введении** обосновывается актуальность поставленных задач, формулируются цели и обсуждается научная новизна диссертационной работы и практическая значимость, перечисляются основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о методах исследований, степени достоверности и апробации полученных результатов, публикациях, личном вкладе автора, а также структура и объём диссертации.

В первой главе приводится обзорное описание основных экспериментальных и теоретических результатов исследований коллективных плазменных возбуждений в трехмерных и двумерных электронных системах.

Вторая глава представляет собой описание технологии изготовления образцов, а также используемых экспериментальных методик. В отдельных параграфах приведено описание используемых оптической, транспортной и микрополосковой методик. Параллельно представлены схемы экспериментальных установок и характеристики используемой измерительной аппаратуры.

Третья глава посвящена изучению физических свойств нового семейства коллективных плазменных возбуждений в двумерной электронной системе – «проксимити» плазмонов (proximity plasmons). Установлено, что плазменные волны данного типа возбуждаются в двумерной электронной системе, частично экранированной металлическим затвором. Изучены физические свойства «проксимити» плазменных возбуждений в структурах, где затвор имеет геометрию полоски, диска и кольца

В четвертой главе исследовано взаимодействие двумерной плазмы со светом. В спектре плазменных возбуждений двумерной электронной системы с высокой подвижностью электронов экспериментально обнаружены и исследованы эффекты запаздывания (электродинамические эффекты). Показано, что из-за взаимодействия плазменной и световой мод, образуются гибридные плазмон-поляритонные возбуждения с рядом уникальных свойств. Также обнаружено и количественно исследовано радиационное затухание плазменных волн

В пятой главе приведены результаты экспериментов, в которых было обнаружено, что в режиме ультра-большого запаздывания вдоль двумерной электронной системы распространяется плазменная волна принципиально нового типа – релятивистский плазмон (relativistic plasmon). Установлено, что в отличие от обычных двумерных плазмонов, которые возбуждаются лишь при $\omega\tau \gg 1$, релятивистские плазменные волны резонансно возбуждаются, когда $\omega\tau < 1$. При этом существование релятивистских плазменных волн определяется новым параметром $2\pi\sigma/c$, который должен быть больше единицы..

В шестой главе экспериментально изучены плазменные и магнитоплазменные возбуждения в высококачественных гетероструктурах AlAs/AlGaAs с носителями заряда, обладающими сильной анизотропией эффективных масс в плоскости квантовой ямы AlAs. Обнаружено, что спектр магнитоплазменных возбуждений в таких системах обладает целым рядом уникальных особенностей: наличием щели в спектре плазменных возбуждений для абсолютно симметричных образцов в форме диска, а также нетривиальной перестройкой плазмонного спектра при перераспределении носителей заряда между различными долинами. По плазменным частотам в нулевом магнитном поле были установлены значения эффективных масс электронов в X_x и X_y долинах AlAs вдоль основных кристаллографических осей.

В седьмой главе описываются эксперименты по обнаружению нового семейства низкочастотных плазменных мод, отвечающих возбуждению акустических краевых магнитоплазмонов (АКМП). Исследованы свойства четырёх АКМП мод ($j=1s, 1, 2$ и 3), отличающихся числом узлов в электронной плотности в направлении поперёк края ДЭС.

В восьмой главе обсуждается неинвазивная методика возбуждения «тёмных» осесимметричных плазменных колебаний в одиночных дисках двумерных электронов. В экспериментах электромагнитное излучение подводилось к образцу по волноводу со встроенным оптоволоконным световодом, который формировал вблизи своего конца локально неоднородное электромагнитное поле. Исследованы физические свойства (дисперсия и затухание) обнаруженных тёмных плазменных мод.

В девятой главе исследуется дисперсия плазменных и магнитоплазменных возбуждений в двумерных электронных системах с близко расположенным задним и латеральным затвором. Установлено, что наличие хорошо проводящего затвора приводит к значительному уменьшению частоты плазменных мод и модификации их спектра с корневой на линейный. Исследована зависимость наблюдаемого «смягчения» частоты плазмона от геометрических размеров ДЭС и взаимного расположения между ДЭС и затвором.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты диссертационной работы представлены в 40 публикациях, опубликованных в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для представления результатов диссертаций и входящих в базы Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Апробация результатов была сделана на ведущих российских и международных конференциях по физике полупроводников и конденсированного состояния.

В процессе чтения диссертационной работы возникли следующие замечания.

1. В гл.5 в качестве характерной физической особенности релятивистских плазмонов указывается, что «флуктуации плотности заряда в ДЭС компенсируются зарядами противоположного знака, поступающими на затвор через внешнюю цепь». Но ведь и в самых первых экспериментах с плазменными волнами, например, в МДП структурах такие флуктуации тоже компенсировались зарядами изображения на полевом электроде. Именно поле этих зарядов и приводит к изменению дисперсии 2Д плазмонов с корневой на линейную. В чем же принципиальное отличие нового типа возбуждений?

2. В гл.7, как мне представляется, все же не достигнуто ясности в сопоставлении экспериментов по АКМП с теорией. Результаты автора по АКМП в твердотельных структурах качественно отличаются от аналогичных работ с ионами гелия (растущая с магнитным полем частота), но это различие в диссертации не комментируется.

3. В гл.8 не сформулировано четко, какие характеристики электромагнитной волны в оптоволокне обеспечивают возбуждение радиальной моды плазменных колебаний, а относительно самой этой моды не сказано, в чем же проявляется влияние на нее эффектов запаздывания.

4. На рисунках 9.2 б) и с) всего по две экспериментальные точки. Но в первом случае теоретическая зависимость линейная, для которой, как известно, двух точек

достаточно, тогда как во втором речь идет о гиперболе, так что картинка выглядит довольно странно.

Работа не свободна и от чисто технических дефектов оформления. Обе панели рис.7.1 помечены буквой а), а в тексте, естественно, говорится об а) и б). В ссылке 157 нет ни одной фамилии – все авторы скрыты под инициалами. В списке литературы встречаются и другие небрежно оформленные ссылки.

Перечисленные выше замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Муравьева В.М. выполнена на очень высоком уровне и представляет большой физический интерес.

Принимая во внимание всё вышесказанное, считаю, что диссертационная работа Муравьева Вячеслава Михайловича «Релятивистские плазменные волны и новые плазмон-поляритонные 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 учёной степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Муравьев Вячеслав Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

Академик РАН, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Российской академии наук (ИФП СО РАН).

«16» сентября 2021 года

Чаплик Александр Владимирович

Согласен на обработку персональных данных.

«16» сентября 2021 года

Чаплик А. В.

Подпись Чаплика А.В. заверяю.

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



Аржанникова С. А.

Контактная информация:

Почтовый адрес: 630090 Новосибирск, пр. Ак.Лаврентьева 13

Телефон: +7 (383) 333-32-64

e-mail: chaplik@isp.nsc.ru