

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Института спектроскопии РАН

профессор Задков В.Н.



О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Муравьева Вячеслава Михайловича «Релятивистские плазменные волны и новые плазмон-поляритонные эффекты в двумерных электронных системах», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

В последние десятилетия экспериментальное изучение свойств низкоразмерных электронных систем привлекает всё большее внимание со стороны научного сообщества. С фундаментальной точки зрения, этот интерес мотивирован богатым спектром нетривиальных физических явлений, таких как целочисленный и дробный квантовый эффект Холла, двумерная сверхпроводимость, Вигнеровская кристаллизация. Центральным вопросом физики низкоразмерных электронных систем является изучение одночастичных и коллективных элементарных возбуждений системы. 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. Во-первых, спектр двумерных плазмонов имеет бесщелевой корневой характер. Во-вторых, заряды в двумерном слое не способны эффективно экранировать трехмерное поле падающей на ДЭС электромагнитной волны. В-третьих, на свойства двумерных

плазмонов оказывает значительное влияние окружение ДЭС. Это вызвано тем, что двумерные системы в большинстве случаев образуются на гетероинтерфейсе, который располагается вблизи поверхности полупроводниковой подложки. Например, наличие экранирующего электрода на поверхности подложки существенно изменяет спектр двумерных плазменных волн, приводя к его линейаризации. Все эти физические свойства делают изучение двумерных плазменных возбуждений **актуальной** областью для исследований. В диссертационной работе Муравьева В.М. обнаружен целый ряд **новых** физических явлений, который формирует отдельное научное направление – двумерная плазмон-поляритоника. Без сомнения данное направление получит дальнейшее научное развитие на базе ИФТТ РАН.

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

Во введении рассматриваются актуальность темы исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Приводятся сведения о личном вкладе автора, апробации результатов (доклады на конференциях), публикациях в рецензируемых журналах, описывается структура и объём диссертации.

Первая глава представляет собой обзор научной литературы по теме диссертационной работы. Описываются результаты теоретических и экспериментальных исследований плазменных возбуждений в трёхмерных и двумерных электронных системах. Подробно описывается состояние исследований в области изучения двумерных плазмон-поляритонных волн

Во второй главе приводится описание экспериментальных образцов и методики измерений. Приведены параметры исследуемых структур и методика их изготовления. Подробно описаны оптическая и микрополосковая методики детектирования плазменных резонансов. Описана экспериментальная установка и приведены характеристики используемых СВЧ и оптических элементов.

Третья глава посвящена изучению физических свойств нового семейства коллективных плазменных возбуждений в двумерной электронной системе – «проксимити» плазмонов (proximity plasmons). Показано, что «проксимити» плазменные волны обладают рядом уникальных физических свойств. Во-первых, их дисперсия сочетает характерные черты как экранированного, так и неэкранированного двумерных плазмонов. Во-вторых, у «проксимити» плазменных мод отсутствует краевая ветвь и они находятся по частоте гораздо ниже чем обычные двумерные плазмоны, возбуждаемые в тех же

полупроводниковых микроструктурах. Также в главе рассмотрены физические свойства «проксимити» плазменных возбуждений в структурах, где затвор имеет геометрию полосы, диска и кольца

В четвертой главе представлены результаты по исследованию взаимодействия двумерной плазмы со светом. В образцах с двумерной электронной системой с высокой подвижностью электронов экспериментально обнаружены проявления эффектов запаздывания (электродинамические эффекты). Показано, что из-за взаимодействия плазменной волны со светом, образуется гибридные плазмон-поляритонное возбуждение с рядом уникальных свойств. Также обнаружен альтернативный механизм взаимодействия двумерной плазмы со светом - радиационное затухание синхронно колеблющихся в плазменной волне носителей заряда.

Пятая глава посвящена обсуждению результатов работ по обнаружению принципиального нового типа плазменных возбуждений – релятивистскому плазмону (relativistic plasmon). Установлено, что в отличие от обычных двумерных плазмонов, которые возбуждаются лишь при $\omega t \gg 1$, релятивистские плазменные волны резонансно возбуждаются, когда $\omega t < 1$. При этом существование релятивистских плазменных волн определяется новым параметром $2\pi\sigma/c > 1$.

В шестой главе обсуждаются экспериментальные результаты по изучению плазменных и магнитоплазменных возбуждений в высококачественных гетероструктурах AlAs/AlGaAs с носителями заряда, обладающими сильной анизотропией эффективных масс в плоскости квантовой ямы AlAs.

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 представлены результаты исследования физических свойств (дисперсии и затухания) «тёмных» плазменных мод. Для этого была разработана особая неинвазивная методика для возбуждения данного класса «тёмных» мод. Впервые исследовано проявление эффектов запаздывания для "тёмных" осесимметричных плазменных возбуждений. Показано, что гибридизация этих возбуждений со светом значительно меньше, чем гибридизация дипольно активных двумерных плазмонов.

Девятая глава посвящена изложению результатов исследования дисперсии 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 корневого 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.

Наибольшую **научную значимость** в данной диссертации представляют следующие полученные в ней результаты:

1. Обнаружено новое семейство плазменных возбуждений в двумерной электронной системе – «проксимити» плазмоны (proximity plasmons). Данный тип плазменных волн наблюдается в ДЭС частично экранированной металлическим затвором. Оказалось, что новое семейство плазменных возбуждений обладает рядом уникальных физических свойств. Во-первых, спектр «проксимити» плазмонов зависит от геометрических параметров затвора и расстояния между ним и ДЭС. Во-вторых, у «проксимити» плазменных мод отсутствует краевая ветвь и они находятся по частоте гораздо ниже чем обычные двумерные плазмоны, возбуждаемые в тех же полупроводниковых микроструктурах. Наконец оказалось, что в случае, если затвор соединен с двумерной системой внешней цепью, то в системе возбуждается «заряженная» релятивистская плазменная мода, обладающая аномально малым затуханием. Совместно с группой из ИРЭ РАН под руководством В.А. Волкова была разработана подробная теория для описания нового семейства плазменных мод. Теория оказалась в отличии с экспериментом.
2. Всесторонне экспериментально исследованы плазменные и магнитоплазменные возбуждения в высококачественных гетероструктурах AlAs/AlGaAs. Отличительной особенностью данного класса гетероструктур является то, что носители заряда в них имеют сильную анизотропию эффективных масс в плоскости AlAs квантовой ямы. Установлено, что спектр двумерных плазменных возбуждений ДЭС на базе AlAs квантовых ям имеет ряд уникальных особенностей. Во-первых, для абсолютно симметричных образцов в форме диска в нулевом магнитном поле в плазмонном спектре наблюдается щель. Во-вторых, плазмонный спектр претерпевает нетривиальное изменение при перераспределении носителей заряда между различными долинами. Из значений плазменных частот было установлено, что величины эффективных масс электронов в X_x и X_y долинах AlAs вдоль основных кристаллографических осей составляют $m_l = (1.10 \pm 0.05) m_0$, $m_{tr} = (0.20 \pm 0.01) m_0$. Проведено детальное исследование поведения плазменных и магнитоплазменных возбуждений в высококачественных AlAs квантовых ямах с различной шириной (4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 и 15 нм). Методом плазмонной спектроскопии был напрямую

измерен $\Gamma - X$ энергетический переход для анизотропных долин AlAs. Было установлено, что данный переход (когда X_x - X_y и X_z долины меняются местами в шкале энергий) происходит при ширине квантовой ямы 6 нм.

3. Обнаружено новое семейство низкочастотных плазменных мод, отвечающих возбуждению акустических краевых магнитоплазмонов (АКМП). Экспериментально исследованы физические свойства четырех АКМП мод ($j=1s, 1, 2$ и 3), где индекс j обозначает число узлов в электронной плотности на краю ДЭС. Установлено, что акустические моды больше всего проявляются в режиме квантового эффекта Холла и их общее число определяется фактором заполнения. Показано, что частота акустических магнитоплазмонов пропорциональна волновому вектору и обратно пропорциональна величине магнитного поля. При этом, АКМП мода с номером j исчезает при факторе заполнения $\nu=2j$. Исчезновение АКМП мод сопровождается «клювообразным» изломом в их магнитодисперсионной зависимости. В экспериментах была выявлена также дополнительная АКМП мода $j=1s$, исчезающая при $\nu=1$. Она наблюдалась при температуре ниже энергии спинового расщепления. Полученные экспериментальные результаты были объяснены перестройкой структуры краевых состояний ДЭС, которые в режиме целочисленного квантового эффекта Холла представляют собой чередование полосок несжимаемой и сжимаемой электронной жидкости.
4. Экспериментально исследован спектр 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 волн и модификации их спектра из корневого в линейный. Исследована зависимость наблюдаемого «смягчения» частоты плазмона от геометрических размеров ДЭС, а также взаимного расположения ДЭС и затвора. На основе полученных научных знаний реализована концепция перестраиваемого плазмонного спектрометра-на-чипе. В таком устройстве при развертке напряжения на заднем затворе наблюдаются интерференционные пики в фото-ЭДС, период которых оказался обратно пропорционален квадратному корню из электронной концентрации.
5. Разработана экспериментальная методика для возбуждения «тёмных» осесимметричных плазменных колебаний в одиночных дисках двумерных электронов. Методика основана на том, что электромагнитное излучение подводится к образцу по волноводу со встроенным оптоволоконным световодом, который формирует вблизи своего конца локально неоднородное электромагнитное поле. Проведены исследования

физических свойств (дисперсия и затухание) обнаруженных тёмных плазменных возбуждений. Установлено отличное согласие экспериментальных результатов с имеющейся теорией. Исследовано проявление эффектов запаздывания для «тёмных» осесимметричных плазменных мод. Экспериментально продемонстрировано, что «тёмные» моды значительно слабее гибридизируются со светом нежели дипольно активные двумерные плазмоны.

Практическая значимость работы заключается в подробном исследовании спектра и затухания плазменных волн в полупроводниковых структурах с различной геометрией. Данные результаты могут найти применение при разработке устройств терагерцовой электроники.

Диссертация не лишена недостатков, среди которых необходимо отметить следующие:

1. В формуле (3.1) не совсем понятно соотношение между волновым вектором плазмона q и расстоянием от ДЭС до затвора h . Аналогичный вопрос относительно соотношения ширины полоски затвора W и h . Ведь очевидно, что когда ширина полоски сравнима с h , то должен наблюдаться переход от дисперсии «проксимити» плазмона к дисперсии обычного незранированного плазменного возбуждения.
2. Кажется, не очень уместным интерпретировать перенормировку плазмонной (формула (4.6)) и циклотронной частот (формула (4.7)) в терминах изменения эффективной массы электронов. Такие рассуждения являются заменой фундаментальных понятий (циклотронная частота, эффективная масса) на частные понятия. Вряд ли динамические характеристики электронов, зависящие от эффективной массы, например, подвижность будут перенормированы согласно формуле (4.7). В этом можно убедиться путём прямого Холловского измерения подвижности. Она не будет зависеть от расстояния до затвора h .
3. В диссертации имеется ряд опечаток. Например, в списке литературы ссылка [122] неточна. В ней DOI и URL указаны неверно.

Сделанные замечания не снижают общей весьма высокой оценки работы.

Диссертация Муравьева В. М. представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, открывающую новое направление в науке. 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. Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

По объёму, научной и практической значимости полученных результатов, работа отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор Муравьев Вячеслав Михайлович несомненно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности: 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад по материалам диссертации был представлен на семинаре лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН и отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН 1 сентября 2021, протокол № 2.

Отзыв составил зав. лаборатории спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН, профессор МФТИ Ю. Е. Лозовик - эксперт в области физики низкоразмерных систем и наноструктур, автор 700 научных работ (14 000 цитирований, $h=58$ – <https://scholar.google.ru/citations?user=MGcdnWwAAAAJ&hl=ru&oi=ao>),

кандидат физико-математических наук

(специальность 01.04.02, теоретическая физика)

Лозовик Юрий Ефремович

Дата: 08.09.2021г.

Согласен на обработку персональных данных



Лозовик Юрий Ефремович

Дата: 08.09.2021г.

Подпись зав. лабораторией Ю. Е. Лозовика заверяю
Ученый секретарь Института спектроскопии РАН
канд. физ.-мат. наук

Р.Р. Кильдиярова

Дата: 08.09.2021г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук. Место нахождения: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5. тел. +7 (495) 851 0579

Электронная почта: isan@isan.troitsk.ru

Сайт: isan.troitsk.ru