

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию 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.

Исследование двумерных электронных систем является магистральным направлением физики полупроводников на протяжении последних 40 лет. За это время были достигнуты впечатляющие результаты, обнаружен ряд эффектов, которые не имеют аналогов в трёхмерных системах. К таким явлениям относятся, в частности, целочисленный и дробный квантовый эффект Холла, Вигнеровская кристаллизация, и целый ряд других. Особое место в существующей проблематике занимают исследования плазменных возбуждений в двумерных системах. Помимо красивой и нетривиальной физики, эти исследования имеют очень высокий потенциал практического использования. Действительно, плазменные возбуждения в двумерных системах обладают значительно более высокими скоростями по сравнению с дрейфовой скоростью электронов, что предоставляет возможность существенно повысить быстродействие устройств, использующих такие возбуждения в качестве переносчиков электрических сигналов. Кроме того, в двумерных системах наблюдается гигантское усиление оптического отклика коллективными плазмон-поляритонными возбуждениями. На этой основе можно создать чрезвычайно чувствительные приёмники терагерцового и суб-терагерцового излучения, которые являются ключевыми элементами многих оптоэлектронных систем. Диссертационная работа В.М. Муравьева посвящена именно описываемому кругу проблем, что и определяет её высокую актуальность.

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 218 страниц текста, 91 рисунок и список литературы из 163 наименований.

В работе получено большое количество новых красивых результатов. Из числа этих результатов хотелось бы особо выделить следующие, определяющие научную новизну работы.

Обнаружено новое семейство плазменных возбуждений в двумерной электронной системе – «проксимити» плазмоны (proximity plasmons). Установлено,

что плазменные волны данного семейства возбуждаются в гибридной системе, состоящей из двумерной электронной системы, частично экранированной металлическим затвором. Продemonстрировано, что в магнитном поле у обнаруженной «проксимити» плазменной моды отсутствует краевая ветвь, а магнитодисперсия имеет квадратичный вид.

Экспериментально изучены 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 2D 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.

Обнаружено новое семейство низкочастотных плазменных мод, отвечающих возбуждению акустических краевых магнитоплазмонов. Показано, что частота акустических магнитоплазмонов пропорциональна волновому вектору и обратно пропорциональна величине магнитного поля.

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. Экспериментально продемонстрировано, что «тёмные» моды значительно слабее гибридизируются со светом нежели дипольно активные двумерные плазмоны.

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.

Достоверность полученных В.М. Муравьевым результатов не вызывает сомнений и определяется тем, что все экспериментальные данные получены с использованием современной экспериментальной техники и апробированных мето-

дик измерений. Полученные в работе данные согласуются с известными экспериментальными результатами других авторов и не противоречат современным представлениям. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами.

Научные результаты, составляющие основу диссертации, опубликованы в наиболее авторитетных российских и международных научных журналах и многократно докладывались на российских и международных научных конференциях самого высокого уровня.

Результаты исследований, проведенных В.М. Муравьевым, представляют несомненный практический интерес. Работа может быть использована в организациях, занимающихся технологиями создания элементов терагерцовой техники

Вместе с тем, по диссертации можно высказать некоторые замечания, которые, впрочем, имеют скорее характер пожеланий.

1. Экспериментальные точки, представленные на вставке к рис. 3.4 и на рис. 3.5b (красные точки), конечно, достаточно хорошо ложатся на теоретические кривые. Однако на первый взгляд, если не знать о теории, соответствующие зависимости ближе к линейным. Было бы интересно добавить к этим точкам данные, снятые при меньшей электронной плотности (рис.3.4) и при большем диаметре кольца (рис.3.5), чтобы отклонение зависимости от линейной было более очевидно.
2. Было бы интересным увидеть данные для низкочастотного резонанса поглощения (рис.5.3), снятые для равных по амплитуде, но противоположных по направлению магнитных полей. Казалось бы, в этом случае должна изменяться киральность краевых магнитоплазмонов. Приведет ли это к изменению особенностей СВЧ-поглощения?
3. Было бы уместно пояснить, что произошло бы с результатами измерений, приведенных в гл.6, если бы количество дисков, либо их размер, изменялся.
4. В тексте работы есть ряд технических недочетов. Например, параметр запаздывания A определяется на стр.79, но в первый раз вводится это понятие на стр.76, и далее активно обсуждается вид дисперсионных зависимостей в зависимости от A (например, рис.4.1). На стр. 79 говорится о «развороте» магнитного поля при фиксированной частоте СВЧ. Вообще говоря, термин «разворот» в применении к вектору предполагает изменение направления последнего при неизменной амплитуде. Автор, вероятно,

имеет в виду термин «развёртка», обозначающий изменение амплитуды поля при неизменном направлении. Есть ряд других неточностей аналогичного характера.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают содержание диссертации. В целом диссертация В.М. Муравьева удовлетворяет всем критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

«08» сентября 2021 года

заведующий кафедрой физического факультета МГУ
член-корр. РАН, профессор,
доктор физ.-мат. наук (01.04.10 – физика полупроводников)
Ленинские горы, 1, стр. 2, Москва 119991, тел. (495)-939-11-51
E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Хохлов Дмитрий Ремович

Согласен на обработку персональных данных.

«08» сентября 2021 года

Хохлов Дмитрий Ремович

Декан физического факультета МГУ
профессор

«08» сентября 2021 года

