



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**имени
М.В. ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Тел.: 939-10-00, 203-65-65
Факс: 939-01-26

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор Московского
государственного университета

имени М.В. Ломоносова

А.А. Федянин

профессор

“ 27 ”

мая

2024 г.



27.05.2024 № 348-24/015-03

На № _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Астраханцевой Анны Сергеевны «Электромагнитные плазменные волны в полупроводниковых и металл-диэлектрических структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа А.С. Астраханцевой посвящена исследованию фундаментальных физических свойств поперечных плазменных волн в системе, где двумерная электронная система (ДЭС) размещается на диэлектрической подложке. Актуальность данной работы весьма высока, и связана с тем, что обнаружение поперечных электромагнитных плазменных волн открывает широкие перспективы для создания новых плазмонных метаматериалов и устройств. Таким образом, данное исследование представляет собой важное направление не только для изучения основ явления, но и для его практического применения в системах ТГц электроники.

В диссертационной работе Астраханцевой А.С. описываются исследования по разработке уникальной методики изготовления тонких диэлектрических мембран с двумерной электронной системой (ДЭС) на поверхности на основе высококачественных гетероструктур GaAs/AlGaAs. Это позволило обнаружить и подробно исследовать

двумерные поперечные плазменные колебания. Был создан прототип плазмонного полупроводникового фазовращателя, а также разработана модель, описывающая его поведение. Также изучено влияние частоты излучения, плотности электронов в ДЭС и параметров полупроводниковых подложек на величину фазового сдвига. Особое внимание уделено исследованию метаповерхностей из ДЭС в виде полосок на тонких мембранах, которые проявляют сильно анизотропный электродинамический отклик. Было показано, как геометрические параметры такой системы влияют на частоту плазменного резонанса. Также была разработана теория, объясняющая, как боковое экранирование приводит к появлению новой плазменной моды при стремлении зазора между полосками к нулю. Полученные экспериментальные данные имеют важное значение с практической точки зрения, поскольку открывают новые перспективы для разработки концепций в плазмонной электронике и создания современных приборов с улучшенными характеристиками.

Диссертационная работа А.С. Астраханцевой состоит из «Введения», пяти глав, «Заключения» и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 118 страниц с 40 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 103 наименования. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах.

Во **введении** сформулирована цель работы, положения, выносимые на защиту, обоснована актуальность исследований. Приведены сведения о структуре и объёме работы, её научной и практической значимости, апробации, о личном вкладе автора, имеется список основных публикаций по теме диссертации.

В **первой главе** приводится литературный обзор некоторых основных теоретических и экспериментальных результатов исследований коллективных плазменных возбуждений в трехмерных и двумерных электронных системах.

Во **второй главе** подробно описана схема экспериментальной установки и ее главных составляющих, приводится методика изготовления исследуемых структур.

В **третьей главе** диссертации изучались возбуждения плазмы в двумерных электронных системах, размещенных на поверхности тонких диэлектрических мембран различной толщины от 23 до 186 микрон. Обнаружено, что эти структуры становятся прозрачными для электромагнитного излучения выше частоты плазменного резонанса. Также выявлено, что пороговая частота зависит от концентрации носителей заряда и толщины мембраны. Экспериментально установлено, что частоту плазменного резонанса можно регулировать в широком диапазоне путем изменения плотности двумерных

электронов или с помощью внешнего магнитного поля. Кроме того, обнаружено, что изменение фазы излучения можно контролировать с помощью внешнего магнитного поля.

В **четвертой главе** исследования описывается разработка плазмонного устройства с использованием диэлектрической мембраны, на поверхности которой размещена двумерная электронная система, для управления фазовым сдвигом терагерцового излучения. В результате экспериментов было установлено, что данное устройство способно регулировать фазу до 41° при потерях в -2.2 дБ и работает эффективно при температурах до 80 К. Исследовано влияние двумерной электронной системы на плазменный фазовый сдвиг, а также изучены воздействие таких параметров, как частота излучения, плотность электронов в ДЭС и характеристики подложки, на этот фазовый сдвиг. Предложена физическая модель, объясняющая полученные результаты. Теоретически установлено, что максимальный возможный фазовый сдвиг в данной конфигурации составляет 180° , в то время как экспериментально достигнут фазовый сдвиг в 105° .

В **пятой главе** диссертации изучен отклик полупроводниковых мембран с решетчатой двумерной электронной системой на терагерцовое излучение. Было выяснено, что при длине волны падающего излучения, значительно превышающей период решетки, данная структура проявляет свойства метаповерхности с плазмонными характеристиками, которые могут контролироваться через геометрию двумерной электронной системы. Электродинамический отклик метаповерхности демонстрирует значительную анизотропию по отношению к ориентации поляризации излучения относительно полос ДЭС. Экспериментально установлено, что при поляризации падающего излучения вдоль полос с ДЭС в спектре пропускания наблюдается плазменный край. Частотой этого края можно управлять, изменяя геометрические параметры метаповерхности. При поляризации падающего излучения поперек полос с ДЭС отклик метаповерхности проявляет совершенно иное поведение. Было обнаружено, что боковое экранирование между смежными полосами ДЭС приводит к появлению нового плазменного режима при уменьшении зазора между полосами до нуля. Также была разработана теоретическая модель, учитывающая дисперсию этого режима.

В **заключении** приводятся основные результаты работы.

В диссертационной работе получены новые интересные научные результаты. Из них, можно отметить следующие:

- Впервые было обнаружено, что при прохождении электромагнитных волн терагерцового частотного диапазона через диэлектрические мембраны с

двумерной электронной системой возникает резонанс, который свидетельствует о возбуждении поперечных электромагнитных плазменных волн. Также впервые был обнаружен и экспериментально изучен плазменный край при прохождении этих волн через систему.

- Были разработаны научные основы и технология для создания нового плазмонного фазовращателя в терагерцовом частотном диапазоне, а также создана физическая модель, описывающая его поведение.
- Кроме того, была создана и изучена новая плазмонная метаповерхность — двумерная электронная система в форме полосок на тонких диэлектрических мембранах. В этой системе впервые был обнаружен новый тип плазменных возбуждений, связанный с сильной взаимной экранировкой плазменных колебаний в соседних полосках.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд замечаний и пожеланий:

1. На рис. 3.2 изображены спектры пропускания мембран различной толщины. Приведены спектры пропускания как мембран без нанесенной сверху структуры (сплошные линии), так и с нанесенной структурой (точки). В некоторых спектральных областях точки лежат выше сплошной кривой, что означает, что в этих спектральных областях пропускание увеличивается при нанесении структуры на мембрану. Этот момент требует пояснений.
2. На стр. 79 указывается, что максимальный сдвиг фазы, который удается получить в фазовращателе, составляет 41 градус (см. также рис. 4.3). Можно ли каким-либо способом увеличить угол сдвига фазы?
3. В исследованных образцах наблюдается весьма высокая подвижность электронов в квантовых ямах. В этих условиях при низких температурах должны наблюдаться осцилляции Шубникова – да Гааза, причем в умеренных магнитных полях, до выхода в режим квантового эффекта Холла, поперечная магнитопроводимость еще не обращается в ноль, а осциллирует при изменении поля. Вопрос заключается в том, ожидаются ли при этом осцилляции угла вращения фазы?
4. В работе имеется незначительное количество опечаток и стилистических погрешностей.

Указанные выше замечания не снижают общей высокой оценки работы, представляющей собой законченное исследование, содержащее новые интересные результаты.

Основные выводы и положения работы являются обоснованными и достоверными. Существенным является личный вклад автора. А.С. Астраханцева принимала активное участие в постановке задачи, в выборе методологических подходов, в разработке технологии изготовления тонких мембран с ДЭС на поверхности, в изготовлении исследуемых образцов, в обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке и написании научных статей. Результаты работы достаточно полно опубликованы в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК, доложены на российских и международных научных конференциях. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание, выводы и основные положения, выносимые на защиту.

Диссертационная работа А.С. Астраханцевой выполнена на высоком научном уровне. По новизне, актуальности, объему и достоверности полученных результатов она соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Астраханцева Анна Сергеевна заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Доклад А.С. Астраханцевой заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ. Отзыв подготовлен членом-корреспондентом РАН, профессором, д.ф.-м.н. Д.Р. Хохловым и утвержден на заседании кафедры 22 мая 2024 г., протокол №4.

Заведующий кафедрой
общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ
член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.



Д.Р. Хохлов

Дмитрий Ремович Хохлов
доктор физ.-мат наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников
Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991
Тел. (495)-939-11-51
E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Подпись Д.Р. Хохлова заверяю

Ваше имя и фамилия
Александр Владимирович
Курбатов


