

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Астраханцевой Анны Сергеевны «Электромагнитные плазменные волны в полупроводниковых и металл-диэлектрических структурах», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

В последние десятилетия активно исследуются свойства плазмы твердого тела, особенно колебания электронной плотности в двумерных электронных системах, двумерные плазмоны. В таких системах можно легко контролировать плазменную частоту, например, меняя электронную плотность с помощью напряжения на затворе. Как правило, под плазмонами понимались только продольные плазменные колебания. Тем не менее, теория допускает существование и поперечных электромагнитных волн, сильно взаимодействующих с двумерной плазмой твердого тела. В последнее время такие возбуждения стали называть двумерными поперечными плазмонами. Эксперименты в этом направлении тормозились жесткими требованиями к образцам. Дело в том, что диэлектрическое окружение существенно влияет на плазменную частоту и характеристики таких плазмонов. В представленной к защите диссертационной работе А.С. Астраханцевой была разработана методика создания тонких диэлектрических мембран с двумерными электронными системами, что позволило обнаружить и изучить двумерные поперечные плазменные колебания. Разработанная технология позволила также сделать первые шаги в прикладном отношении. Был создан прототип плазмонного полупроводникового фазовращателя и разработана модель, описывающая его поведение. Значительным достижением является создание и исследование анизотропных метаповерхностей, состоящих из двумерных электронных систем в форме полосок на тонких мембранах. Было продемонстрировано, как геометрические параметры такой системы оказывают влияние на частоту плазменного резонанса. Эти экспериментальные результаты открывают новые перспективы в области двумерной плазмонной электроники. Поэтому **актуальность** диссертации А.С. Астраханцевой не вызывает сомнений.

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

**Во введении** сформулированы цели работы, обоснованы актуальность темы, научная новизна, достоверность полученных результатов и их апробация, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована структура диссертации и представлен список основных публикаций по теме диссертационной работы.

**Первая глава** содержит обзор актуальных теоретических и экспериментальных данных, касающихся коллективных плазменных возбуждений в трехмерных и двумерных электронных системах.

**Во второй главе** представлена обзорная информация о процессе создания образцов и использованных экспериментальных методиках. Описаны основные характеристики изученных экспериментальных образцов (на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs), подробно рассмотрен процесс создания тонких диэлектрических мембран с двумерными электронными системами на их поверхности, а также методы изготовления фазовращателей и метаповерхностей с использованием данной технологии. Также изложены основные принципы используемого для измерений интерферометра Маха-Цендера.

**В третьей главе** исследовались плазменные возбуждения, возникающие в двумерных электронных системах на поверхности изготовленных диссертантом тонких диэлектрических мембран. Мембраны имели толщину от 23 до 186 микрон. Было обнаружено, что эти структуры становятся прозрачными для электромагнитного излучения выше частоты плазменного резонанса. Также было продемонстрировано, что пороговая частота зависит от концентрации носителей заряда и толщины мембраны. Экспериментально было установлено, что частоту плазменного резонанса можно настраивать в широком диапазоне путем изменения плотности двумерных электронов или с

помощью внешнего магнитного поля. Кроме того, обнаружено, что, применяя внешнее магнитное поле, можно управлять фазой излучения.

**В четвертой главе** описывается создание экспериментального образца плазмонного устройства, которое использует диэлектрическую мембрану с двумерной электронной системой (ДЭС) на ее поверхности для управления фазовым сдвигом прошедшего субтерагерцового излучения. Экспериментально установлено, что данное устройство обладает возможностью существенно изменять фазу волны, вплоть до  $41^\circ$ , с вносимыми потерями в -2.2 дБ. Также продемонстрирована работоспособность фазовращателя при температурах до 80 К. Проведено экспериментальное исследование влияния двумерной электронной системы на плазменный фазовый сдвиг, а также изучено воздействие частоты излучения, плотности электронов в ДЭС и параметров подложки на этот фазовый сдвиг. В работе также предложена физическая модель, которая хорошо описывает полученные результаты. Теоретически установлено, что максимальный фазовый сдвиг в данной конфигурации составляет  $180^\circ$ . Экспериментально продемонстрирован фазовый сдвиг величиной  $105^\circ$ .

**В пятой главе** исследован субтерагерцовый отклик полупроводниковых мембран с решетчатой двумерной электронной системой. Оказалось, что при длине волны входящего излучения, значительно превышающей период решетки, данная структура ведет себя как метаповерхность с плазмонными свойствами, которые могут быть управляемы через геометрию ДЭС. Электродинамический отклик метаповерхности показал значительную анизотропию по отношению к ориентации поляризации излучения относительно полос ДЭС. Экспериментально установлено, что при поляризации входящего излучения вдоль полос с ДЭС в спектре пропускания наблюдается плазменный край. Частотой этого края можно управлять, изменяя геометрические параметры метаповерхности. Совершенно другое поведение демонстрирует отклик метаповерхности при поляризации входящего излучения поперек полос с ДЭС. Было обнаружено, что боковое экранирование между смежными полосами ДЭС приводит к возникновению нового плазменного режима при уменьшении зазора между полосами до нуля.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертация А.С. Астраханцевой является завершенным оригинальным научным исследованием, выполненным на высоком уровне. **Достоверность результатов и обоснованность выводов** не вызывают сомнений на основании их широкой экспериментальной проверки. Результаты, изложенные в диссертации А.С. Астраханцевой, получены впервые и дают новые сведения о природе двумерных поперечных плазменных колебаний. Поэтому их **новизна** не вызывает сомнений, а **научная значимость** очевидна.

Несколько слов о практическом значении результатов диссертации. В 4 главе был разработан прототип плазмонного фазовращателя на полупроводниковой технологии и разработана модель, описывающая его функционирование. Было изучено воздействие частоты излучения, плотности электронов в двумерной электронной системе и параметров полупроводниковых подложек (основанных на высококачественных гетероструктурах GaAs/AlGaAs) на фазовый сдвиг. В главе 5 исследованы метаповерхности из ДЭС в виде полосок на тонких мембранах, которые демонстрируют сильно анизотропный электродинамический отклик. Полученные экспериментальные результаты открывают возможности для разработки новых концепций и создания новых приборов в плазмонной электронике. Таким образом, не вызывает сомнения и **практическая значимость** работы.

Диссертация написана весьма доходчивым языком. Тем не менее, у оппонента при чтении ее текста возникло три вопроса,

1. Рис. 3.2. Экспериментальные данные сравниваются с теорией, формула (3.8), которая нетривиально зависит от диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Позволяет ли экспериментальная точность отличить точки на рис. 3.2 для случая, когда в формуле (3.8) в знаменателе под корнем стоит не  $(\epsilon-1)$ , а просто  $\epsilon$  ?
2. Тот же вопрос для рис. (3.4).
3. Рис. 5.8. Почему на графике такой резкий скачок?

Указанные вопросы имеют уточняющий характер. Они не имеют принципиального значения и не снижают общей высокой оценки работы.

Основные результаты работы А.С. Астраханцевой были опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам. Поставленная в диссертации цель была достигнута. Автореферат полно и правильно передаёт содержание диссертации.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что представленная к защите работа Анны Сергеевны Астраханцевой «Электромагнитные плазменные волны в полупроводниковых и металл-диэлектрических структурах» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современной физики конденсированного состояния тему. Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а сам диссертант, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», главный научный сотрудник Лаборатории методов получения тонких пленок и пленочных структур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Волков Владимир Александрович

«19» июня 2024 года

Согласен на обработку персональных данных.

Волков В. А.

«19» июня 2024 года

Подпись Волкова В.А. заверяю

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

к.ф.-м.н.

«19» июня 2024 года



Чусов Игорь Иванович

**Контактная информация:**

Почтовый адрес: 125009, Россия, Москва, ул. Моховая д. 11 к. 7

Телефон: +7 (916) 338-47-63

e-mail: [Volkov.v.a@gmail.com](mailto:Volkov.v.a@gmail.com)