

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».

Физика плазмы в твердом теле является одной из самых популярных тем в науке, она постоянно находится в развитии, все время обогащается новыми идеями и методами. С особым вниманием ученые подходят к изучению двумерных плазмонов - колебаний электронной плотности в двумерных электронных системах (ДЭС). ДЭС довольно легко управлять, например, прикладывая внешнее магнитное поле или меняя концентрацию носителей. Диэлектрическая среда, окружающая ДЭС, очень существенно влияет на плазменную частоту и спектр плазмонов. Ранее исследуемые двумерные плазменные колебания интерпретировались как продольные плазменные колебания, однако, теоретики предсказали существование и поперечных электромагнитных двумерных плазменных волн. Диссертация Астраханцевой Анны Сергеевны как раз посвящена обнаружению и исследованию поперечных двумерных плазменных волн. В данной диссертации разработана методика создания тонких диэлектрических мембран с двумерными электронными системами для изучения двумерных поперечных плазменных колебаний. Также создан прототип плазмонного полупроводникового фазовращателя и предложена теоретическая модель для описания его поведения. Также важной частью работы было создание и изучение метаповерхностей, состоящих из двумерных электронных систем в форме полосок на тонких мембранах, демонстрирующих сильно анизотропное поведение. Эксперименты подтвердили, что параметры геометрии такой системы влияют на частоту плазменного резонанса, открывая новые перспективы для развития плазмонной электроники и улучшения характеристик приборов. Таким образом, диссертация А.С. Астраханцевой является очень **актуальной**.

Диссертация 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 объеме работы, её научной и практической значимости, апробации, о личном вкладе автора, имеется список основных публикаций по теме диссертации.

Первая глава приводится литературный обзор некоторых основных теоретических и экспериментальных результатов исследований коллективных плазменных возбуждений в трехмерных и двумерных электронных системах.

Во второй главе приводят сведения о процессе создания образцов и применяемых экспериментальных методах. Подробно описываются основные характеристики исследуемых образцов (гетероструктуры GaAs/AlGaAs), процесс формирования тонких диэлектрических мембран с двумерными электронными системами на них, а также методы изготовления фазовращателей и метаповерхностей с использованием этой технологии. Также подробно излагаются основные принципы интерферометра Маха-Цендера, который используется для измерений.

В третьей главе исследовались плазменные возбуждения, возникающие в двумерных электронных системах на поверхности 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.

Третья глава посвящена изучению поперечных плазменных возбуждений, которые возникают в двумерных электронных системах на поверхности тонких диэлектрических мембран. Толщина мембран варьировалась от 23 до 186 микрон. Было обнаружено, что эти структуры становятся прозрачными для электромагнитного излучения выше частоты плазменного резонанса. Также было установлено, что пороговая частота зависит от концентрации носителей заряда и толщины мембраны. Экспериментально было подтверждено, что частоту плазменного резонанса можно изменять в широком диапазоне путем изменения плотности двумерных электронов или с помощью внешнего магнитного поля. Кроме того, было обнаружено, что при приложении внешнего магнитного поля можно контролировать фазу излучения.

В четвертой главе представлена разработка экспериментального плазмонного устройства, использующего диэлектрическую мембрану с двумерной электронной системой (ДЭС) для управления фазовым сдвигом терагерцового излучения. Исследования показали, что это устройство может регулировать фазовый сдвиг до 41° с потерями сигнала на уровне -2.2 дБ. Продемонстрирована работа фазовращателя при температурах до 80 К. Было проведено экспериментальное исследование влияния ДЭС на плазменный фазовый сдвиг, а также изучено воздействие различных факторов, таких как частота излучения, плотность электронов в ДЭС и параметры подложки, на величину этого сдвига. Предложена физическая модель, которая успешно объясняет полученные результаты. Теоретические расчеты показали, что максимальный фазовый сдвиг в такой конфигурации может достигать 180° , а в эксперименте был продемонстрирован фазовый сдвиг в 105° . Результаты работы свидетельствуют о перспективности использования ДЭС в плазмонных устройствах для управления фазой терагерцового излучения, открывая возможности для разработки новых технологий в области терагерцовой электроники и оптики.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию терагерцового отклика полупроводниковых мембран, оснащенных решетчатой двумерной электронной системой (ДЭС). Обнаружено, что при определенных условиях, когда длина волны падающего излучения значительно превышает период решетки, структура с ДЭС проявляет свойства метаповерхности с управляемыми плазмонными свойствами. Эксперименты показали, что электродинамический отклик метаповерхности сильно зависит от ориентации поляризации падающего излучения относительно полос ДЭС, демонстрируя значительную анизотропию. При поляризации вдоль полос ДЭС в спектре пропускания наблюдался плазменный край, частоту которого можно было регулировать путем изменения геометрических параметров метаповерхности. Однако, когда поляризация падающего излучения была перпендикулярна полосам ДЭС, отклик метаповерхности отличался кардинально. Обнаружено, что боковое экранирование между смежными полосами ДЭС приводит к возникновению нового плазменного режима при уменьшении зазора между полосами. Этот режим описан теоретической моделью, учитывающей его дисперсию.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертационная работа содержит ряд важных научных достижений и открытий. Среди них:

- Впервые было обнаружено, что прохождение электромагнитных волн терагерцового диапазона через диэлектрические мембраны с двумерной электронной системой вызывает резонанс, указывающий на возбуждение поперечных плазменных волн.
- Были разработаны научные основы и технология для создания плазмонного фазовращателя, работающего в терагерцовом диапазоне частот.
- Еще одним важным достижением стало создание и изучение новой плазмонной метаповерхности - двумерной электронной системы в форме полосок на тонких диэлектрических мембранах. Также была разработана теория, описывающая как боковое экранирование приводит к появлению новой плазменной моды при стремлении зазора между полосками к нулю.

В целом, диссертационная работа Астраханцевой А.С. выполнена на высоком научном уровне, содержит в себе большое множество исследований, новых экспериментальных результатов, обладает единой и цельной тематикой. Диссертация написана доходчиво, её **научные положения обоснованы**, подтверждены теоретическими расчётами и несут в себе большую **научную и практическую значимость**. **Новизна и достоверность результатов** не вызывают сомнений. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах в высокорейтинговых научных журналах и неоднократно обсуждались на международных и российских конференциях. Поставленная в диссертации цель была достигнута. Автореферат полно и правильно передаёт содержание диссертации.

Необходимо отметить личный вклад автора – Астраханцева А.С. 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.

Вместе с тем, диссертация не лишена некоторых недостатков:

- 1) В выводах к главе 3 говорится о зависимости от концентрации «...Также было показано, что пороговая частота зависит от концентрации носителей и толщины мембраны...». Однако, в самой главе 3 никаких измерений от концентрации не приведено.
- 2) В работе приведены зависимости сдвига фазы и пропускания от частоты. Как правило они имеют одинаковый характер, что, видимо, объясняется связью действительной и мнимой части проводимости. Таким образом структуры хорошо изменяют фазу тогда же, когда поглощение в них велико. Есть ли какой-то оптимум по частоте, который позволяет провести фазовый сдвиг без слишком сильного поглощения?
- 3) Стр. 64. формула 3.8 - важное утверждение берется на первый взгляд из ниоткуда - нет ни ссылки, ни вывода его. Наверное, это известно, но хотелось бы ссылку. Прокомментируйте пожалуйста.
- 4) «GaAs очень хрупкий материал, поэтому любые попытки ускорить процесс отклеивания образцов (будь то стремление оторвать образец пинцетом при нагреве и разжижении клея или нагрев ацетона с погруженными в него образцами, которые будут неизбежно сопровождаться чрезмерным напряжением непрочной структуры) почти наверняка приведут к разрушению тонкой мембраны» -- непонятно, приведут или нет.
- 5) Не очень понятно, как делалась развертка по магнитному полю на рис. 4.5(b).
- 6) Замечание: в главе 3, 4 и 5 есть краткие описания экспериментальной установки, которая подробно описана в главе 2.
- 7) "Плотность электронов под затвором линейно зависит от приложенного на затвор напряжения до значения $U_g = -1.5$ В, в то время как плотность насыщается при $n_s \approx 2 \times 10^{11}$ см⁻²." -- непонятная фраза.

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

Заключение. Диссертационная работа Астраханцевой Анны Сергеевны является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новое решение актуальной научной и практической задачи обнаружения и исследования поперечных двумерных плазменных возбуждений, а также создания и исследования на основе данного явления прототипа фазовращателя в терагерцовом частотном диапазоне и метаповерхностей. Автореферат и научные публикации правильно и полностью отражают содержание диссертации. Считаю, что диссертационная работа «Электромагнитные плазменные волны в полупроводниковых и металл-диэлектрических структурах» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней»), а ее автор Астраханцева Анна Сергеевна заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», ведущий научный сотрудник, заведующий Лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток Института физики микроструктур РАН - филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН)

Морозов Сергей Вячеславович

«19» июня 2024 года

Согласен на обработку персональных данных.

Морозов Сергей Вячеславович

«19» июня 2024 года

Подпись Морозова Сергея Вячеславовича заверяю.

Ученый секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.

Гапонова Дария Михайловна



Контактная данные оппонента:

тел. +7 (831) 417-94-82, e-mail: more@ipmras.ru

Место работы.

Фактический адрес: ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Нижегородская обл., Кстовский район, 603087, Россия

Почтовый адрес: ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

Название организации: Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН)

Телефон: +7 (831) 417-94-82