

"Исследование кинетических и оптических явлений в наноматериалах с целью создания новых источников терагерцового излучения" (шифр "2011-1.2.2-207-008")

В отчете представлены результаты исследований по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук в следующих областях:- нанотехнологии и наноматериалы;- механотроника и создание микросистемной техники; - создание биосовместимых материалов;- создание и обработка композиционных и керамических материалов;- создание и обработка кристаллических материалов; - создание и обработка полимеров и эластомеров; - создание мембран и каталитических систем; - металлургические технологии; - строительные технологии" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий" федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Настоящий проект, рассчитанный на три года, посвящен исследованию кинетических и оптических явлений в различных микро- и наноструктурах в терагерцовой области спектра и разработке физических основ создания источников терагерцового излучения нового типа. Широкому использованию терагерцового излучения во многих областях науки и техники препятствует отсутствие источников излучения с необходимыми параметрами. Среди существующих лазеров терагерцового диапазона на основе наноматериалов необходимо отметить квантовые каскадные лазеры (ККЛ) – униполярные безынжекционные лазеры нового типа, идея которых была высказана советскими физиками в 1972 году, а реализована спустя 20 лет в США. С помощью квантовых каскадных лазеров на сегодня перекрыт диапазон длин волн от 4 до 120 мкм (т.е. средний инфракрасный диапазон и – частично – терагерцовый диапазон). Такие лазеры в настоящее время разрабатываются в научных лабораториях США, нескольких стран Европы, Японии, выпускаются рядом зарубежных фирм. В России ККЛ пока не созданы, т.к. они очень сложны по конструкции и требуют использования дорогостоящей прецизионной технологии роста наноструктур. Двумерные электроны в наноструктурах обладают значительно более высокой подвижностью, чем обычные трехмерные электроны в объемных полупроводниках. Это позволяет легко увеличивать эффективную температуру двумерных электронов, прикладывая латеральное электрическое поле. В результате неравновесные электроны могут дать интенсивную эмиссию в терагерцовом

диапазоне непосредственно за счет теплового излучения горячих электронов. Первые работы в этом направлении проводились с MOSFET структурами на основе кремния и с одиночными гетеропереходами AlGaAs/GaAs. Однако максимальный разогрев электронов в этих работах не превышал 100 К, и наблюдавшееся в эксперименте терагерцовое излучение было недостаточно интенсивным. В рамках настоящего проекта разрабатываются наноструктуры, ориентированные на существенно более интенсивный разогрев двумерных электронов, что позволит обеспечить более интенсивную эмиссию терагерцового излучения. Разрабатываемые в рамках проекта новые наноматериалы на основе полупроводников A^3B^5 обеспечат существенный прогресс в области терагерцовой фотоники. Важно подчеркнуть, что разрабатываемые на основе новых наноматериалов источники терагерцового излучения являются весьма компактными и чрезвычайно быстродействующими.

В ходе реализации 1-го этапа проекта созданы высококачественные микро- и наноструктуры на основе полупроводников A^3B^5 , определены их параметры. Исследованы вольтамперные характеристики эпитаксиальных слоев GaN, InSb и InAs в латеральном электрическом поле. В эпитаксиальных слоях GaN достигнут разогрев электронов до 200 К при температуре решетки 4.2 К. В эпитаксиальные слои InSb и InAs электроны имеют значительно более высокие подвижности, чем электроны в слоях GaN. Благодаря этому разогрев электронов в первых идет более эффективно, чем в последних. Однако в InSb и InAs уже в сравнительно небольших электрических полях (600 В/см и 1600 В/см, соответственно) начинается межзонный пробой из-за относительно малой ширины запрещенной зоны у этих полупроводников. Тем не менее в области предпробойных полей удастся достичь существенного разогрева электронов: до 140 К и 330 К, соответственно. Анализ экспериментальных вольтамперных характеристик наноструктур GaN/AlGaN с помощью уравнения баланса мощности и теоретического расчета скорости потерь энергии двумерными электронами показал, что в этих структурах электроны разогревались полем $E \sim 4000$ В/см до температуры примерно 400 К (при температуре решетки 4.2 К).

В рамках 2-го этапа проекта была получена эмиссия терагерцового излучения из наноструктур и микроструктур на основе полупроводников A^3B^5 , проведены экспериментальные и теоретические исследования эмиссии терагерцового излучения. Выполнен теоретический модельный расчет эмиссии терагерцового излучения горячих электронов из тонких пленок (наноструктур и микроструктур). Создана оригинальная конструкция оптического блока экспериментальной установки, позволяющая проводить исследования эмиссии терагерцового излучения в широком диапазоне криогенных

температур. Проведено экспериментальное исследование эмиссии терагерцового излучения из наноструктур и микроструктур на основе полупроводников A^3B^5 в сильных электрических полях при криогенных температурах (4.2–100 K), включая исследование спектра терагерцового излучения. На основании сопоставления эксперимента с теоретическими моделями определены микроскопические механизмы наблюдаемых эффектов.

Другое научное направление, реализуемое в рамках данного проекта, связано с терагерцовой плазмоникой. Физика плазмон-поляритонов в двумерных наноструктурах активно развивается в последнее десятилетие. Новым направлением в этой области является получение эмиссии терагерцового излучения за счет поверхностных плазмон-поляритонов, взаимодействующих со структурными неоднородностями наноматериала. Первые исследования в этой области были выполнены в 2010–2011 годах. В рамках данного проекта предполагается расширить и интенсифицировать научные поиски в данном направлении, главным образом, за счет создания и исследования новых наноматериалов. В частности, изготавливаются и изучаются тонкие проводящие слои из различных полупроводников A^3B^5 , содержащие как случайные, так и регулярно расположенные неоднородности, за счет чего реализуются условия для эффективного возбуждения плазмон-поляритонов в терагерцовом диапазоне частот, а также для интенсивной эмиссии терагерцового излучения.

В рамках 3-го этапа проекта были рассмотрены различные варианты структур, эффективных для возбуждения плазмон-поляритонов. Проведены теоретические расчеты характеристик плазмон-поляритонов для различных микро- и наноструктур на основе полупроводников A^3B^5 , в частности, GaN и GaAs. Методом молекулярной пучковой эпитаксии и методом МОС-гидридной эпитаксии изготовлены пилотные образцы структур на основе полупроводников GaN и GaAs, предназначенных для изучения плазмон-поляритонов. Созданы омические контакты для приложения латерального электрического поля. Проведена экспериментальная апробация пилотных образцов. Исследованы вольт-амперные характеристики в слабых и сильных электрических полях при различных температурах.

В рамках 4-го этапа проекта были выращены различные структуры на основе GaN. Проведены экспериментальные исследования эмиссии терагерцового излучения в наноструктурах и микроструктурах на основе GaN в сильных электрических полях при криогенных температурах. Получена полевая зависимость интегральной интенсивности терагерцового излучения для образцов различной конструкции при криогенных температурах. Рассмотрены теоретические модели эмиссии терагерцового излучения

горячими электронами и горячими плазмон-поляритонами. Определены микроскопические механизмы наблюдавшейся эмиссии терагерцового излучения. Определены микроскопические механизмы наблюдавшейся эмиссии терагерцового излучения. Сопоставление эксперимента с теорией показало, что при определенных условиях терагерцовое излучение горячих плазмон-поляритонов имеет значительно большую интенсивность, чем излучение горячих электронов.

В ходе выполнения работ по 5-му этапу проекта разработаны и изготовлены различные структуры на основе GaAs и GaN. Проведены экспериментальные исследования эмиссии терагерцового излучения в наноструктурах и микроструктурах на основе GaAs и GaN в сильных электрических полях при криогенных температурах. Получена полевая зависимость интегральной интенсивности терагерцового излучения для образцов различной конструкции при криогенных температурах. Исследованы спектры терагерцового излучения. Рассмотрены теоретические модели эмиссии терагерцового излучения горячими электронами и горячими плазмон-поляритонами. Определены микроскопические механизмы наблюдавшейся эмиссии терагерцового излучения. Сопоставление эксперимента с теорией позволило определить соотношение вкладов различных микроскопических механизмов в эмиссию терагерцового излучения. Составлен научно-технический отчет, опубликована статья в реферируемом журнале, сделаны 2 доклада на российских конференциях.

Таким образом, задачи, поставленные на 5-м этапе проекта, успешно выполнены. Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием данных, полученных на эксперименте, с расчетом, а также использованием современных высокоточных методов исследования. Все результаты, полученные в ходе выполнения проекта, являются новыми. Они могут быть использованы для разработки источников излучения терагерцового диапазона.

Проректор по научной работе

Руководитель работ по
государственному контракту

Д.Ю. Райчук

В.А. Шалыгин

