

"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.

Настоящей 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/AlGaIn 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 ходе выполнения работ по 4-му этапу проекта 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. Сопоставление эксперимента с теорией показало, что при определенных условиях терагерцовое излучение горячих плазмон-поляритонов имеет значительно большую интенсивность, чем излучение горячих электронов. Составлен научно-технический отчет, опубликована статья в реферируемом журнале, сделан доклад на международной конференции.

Таким образом, задачи, поставленные на 4-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

Д.Ю. Райчук

Руководитель работ по государственному контракту

В.А. Шалыгин

