

Аннотация отчета по проекту

"Оптические и фотоэлектрические свойства наноматериалов в дальнем и среднем инфракрасном диапазонах спектра"

Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия

№ 1.3.2 Проведение научных исследований целевыми аспирантами.

ГК №14.740.11.0477 от 01 октября 2010 г.

Изучение новых оптических явлений в наноматериалах в среднем и дальнем инфракрасном (ИК) диапазонах актуально и важно как с точки зрения фундаментальной физики наноматериалов и низкоразмерных систем, так и с прикладной точки зрения, т.к. на основе изучения оптических явлений этих диапазонов могут быть созданы новые приборы, в частности источники и детекторы излучения. Возрастающий интерес источникам излучения указанных диапазонов связан с широкими возможностями их использования в различных областях науки, техники и медицины. С их помощью можно инспектировать содержимое грузовых контейнеров, находить спрятанное оружие, биологические и химически активные вещества, осуществлять диагностику полупроводников, а также расширить диапазон электромагнитного излучения, применяемого для беспроводной связи. Уже сейчас в ряде аэропортов стоят сканеры взрывчатых веществ, но, из-за большой цены (около полумиллиона долларов США) повсеместное их использование затруднено. Измерение поглощения лазерного излучения этого диапазона может быть основой высокочувствительных методов спектроскопии для анализа газовых смесей и экологического мониторинга, контроля за утечками из магистральных газопроводов и др. В последние годы активно разрабатываются системы, позволяющие выявить наличие запрещенных препаратов в запечатанном конверте без его вскрытия. Анализируя спектр поглощения исследуемого образца и сравнивая его с имеющейся библиотекой спектров, характерных для различных веществ, можно определить содержимое конверта. Использование инфракрасного излучения позволяет изучать процессы в живых клетках, диагностировать состояние внутренних органов человека и животных. В нескольких медицинских центрах уже исследуются возможности использования излучения дальнего ИК диапазона для диагностики рака кожи. Дальний ИК диапазон интересует также астрономов, поскольку 98% фотонов, излученных со времени «большого взрыва», лежат в субмиллиметровом и дальнем ИК диапазоне.

Результаты, полученные на первом этапе работ:

Самым современным методом полупроводниковых технологий – методом молекулярной пучковой эпитаксии были выращены наноструктуры с легированными донорами квантовыми ямами (КЯ) GaAs/AlGaAs и лазерные наноструктуры с КЯ InGaAsSb/InAlGaAsSb.

Проведен анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ) из наноматериалов с КЯ GaAs/AlGaAs. В результате была найдена зависимость температуры горячих носителей заряда от уровня оптической накачки. Эти данные были сравнены с расчетом на базе уравнения баланса мощности. Оказалось, что эта зависимость в легированных КЯ не является монотонной, чему в работе дано объяснение.

Исследование и анализ спектров ЭЛ из наноматериалов InGaAsSb/InAlGaAsSb в режиме индуцированного излучения позволили установить нарушение стабилизации концентрации носителей заряда с током. Анализ причин отсутствия стабилизации концентрации носителей заряда привел к выводу, что оно связано с разогревом носителей заряда. Была найдена степень разогрева носителей заряда и проведено сравнение с расчетом, проведенном с учетом и без учета накопления полярных оптических фононов. Лучшее согласие дает расчет без учета накопления фононов. Рассмотрены возможные причины – влияние интерфейсов на время жизни фононов и вклад интерфейсных фононов в рассеяние энергии электронов, не учтенный в расчетах.

Изучена динамика нарастания и спада фотолюминесценции в пикосекундном и наносекундном диапазонах при возбуждении неравновесных носителей заряда импульсами фемтосекундного диапазона (метод “up-conversion”).

Установлены механизмы рекомбинации носителей заряда, найдены времена жизни для разных механизмов рекомбинации: излучательной рекомбинации, безызлучательной, рекомбинации Шокли-Рида-Холла через ловушки и оже-рекомбинации. Даны рекомендации по уменьшению роли безызлучательной рекомбинации и улучшению характеристик лазера.

Основные результаты второго этапа:

Был проведен расчет энергетического спектра носителей заряда и примесей в наноструктурах с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различных типов: легированными донорами (кремний, *n*-тип проводимости) и легированными акцепторами (бериллий, *p*-тип проводимости). Согласно расчетам, в энергетическом спектре примесных состояний в квантовых ямах появляются так называемые резонансные уровни примесей. На основании проведенных расчетов для наноструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs обоих типов

был разработан дизайн наноструктурного материала со слоями полупроводников нанометровых размеров для исследований в среднем инфракрасном спектральном диапазоне. Данные структуры выращивались на полуизолирующей подложке GaAs современным методом полупроводниковых нанотехнологий – методом молекулярной пучковой эпитаксии.

Наногетероструктуры с квантовыми ямами GaN/AlGaIn, применяемые при создании транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT - High Electron Mobility Transistor), были выращены другим методом – методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений. Это метод получения материалов, в том числе эпитаксиальных слоев полупроводников, путём термического разложения (пиролиза) металлоорганических соединений, содержащих необходимые химические элементы. В отличие от молекулярно-пучковой эпитаксии рост осуществляется не в высоком вакууме, а из парогазовой смеси пониженного давления (от 2 до 100 кПа).

Для определения условий, в которых можно наблюдать дальнейшее инфракрасное излучение были исследованы вольтамперные характеристики образцов с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, легированными донорами кремния. Исследования проводились в широком интервале температур, с этой целью был изготовлен специальный держатель. Температура варьировалась в пределах от 4.2 К до 200 К. Для предотвращения нагревания образца протекающими токами ВАХ регистрировались в импульсном режиме. Напряжение в виде импульсов длительностью 2 мкс формировалось генератором импульсов сильного поля.

Характеризация наноматериала с квантовыми ямами *p*-GaAs/AlGaAs с помощью атомно-силового микроскопа показала хорошее кристаллическое совершенство полученного наноматериала и соответствие его параметров заданным значениям. Это также подтверждается характеристикой структур по спектрам фотолюминесценции. Положение максимумов спектров межзонной фотолюминесценции прекрасно соответствует расчетным значениям. Характеризация наноматериала с помощью измерений низкотемпературных вольтамперных характеристик показала отсутствие сильного неоднородного уширения примесных состояний акцептора с квантовой яме, что видно по ярко выраженному участку примесного пробоя при температуре жидкого гелия с увеличением проводимости на 5 порядков за счет увеличения концентрации свободных дырок в первой подзоне размерного квантования в сильных электрических полях, вызванного процессами ударной ионизации. В результате исследований вольтамперных характеристик показано, что в выращенных наноструктурах с квантовыми ямами *p*-

GaAs/AlGaAs отсутствует сильное неоднородное уширение примесных состояний акцептора, что облегчает исследование резонансных состояний примесных центров в таких структурах.

Для определения условий, в которых можно наблюдать ТГц излучение в наноструктурах *n*-GaAs/AlGaAs были исследованы вольтамперные характеристики образцов. Во избежание перегрева образцов электрическое поле прикладывалось в виде последовательности импульсов. На основе полученных ВАХ был сделан вывод, что в полях более 10 В/см при $T = 4.2$ К наблюдается примесный пробой и возможно наблюдение длинноволнового излучения.

Для наноструктур с квантовыми ямами GaN/AlGaN были измерены ВАХ при разных температурах. Из экспериментальных ВАХ была определена полевая зависимость подвижности двумерных электронов при температуре от 4,2 до 300 К. При расчете предполагалась неизменность концентрации электронов в квантовой яме на гетерогранице GaN/AlGaN. Данные исследования показали, что в сильных электрических полях происходит существенный разогрев двумерных электронов. Это позволяет надеяться на интенсивное излучение 2D электронов.

В ходе работ по третьему этапу проекта были получены следующие результаты:

Были экспериментально исследованы вольтамперные характеристики наногетероструктур GaN/AlGaN в латеральном электрическом поле, в том числе и в области сильных полей (до 4000 В/см) в широком диапазоне температур (4,2 – 300 К). При температуре кристаллической решетки 4,2 К температура горячих электронов достигала 400 К (в электрическом поле около 4000 В/см).

Экспериментально исследована эмиссия дальнего ИК излучения горячими двумерными электронами из гетероструктур GaN/AlGaN. Исследования проведены в спектральном диапазоне 45 – 130 мкм при температуре кристаллической решетки 4,2 К в сильных электрических полях (до 4000 В/см).

Проведены модельные теоретические расчеты спектров эмиссии дальнего ИК излучения горячими двумерными электронами в квантовой яме GaN/AlGaN. Показано, что спектр теплового излучения горячих двумерных электронов существенно отличается от спектра эмиссии абсолютно черного тела при такой же температуре. В частности, максимум спектральной кривой для горячих электронов существенно сдвинут в длинноволновую сторону и при электронных температурах 100 – 400 К его положение соответствует дальнему ИК излучению.

Проведен модельный расчет полевой зависимости интегральной интенсивности дальнего ИК излучения. Экспериментальные результаты находятся в хорошем качественном согласии с теорией. Заметное количественное расхождение теории и эксперимента, наблюдаемое в электрических полях свыше 200 В/см, может быть объяснено накоплением неравновесных оптических фононов, которое не было учтено в рассмотренной простейшей модели.

Проведены патентные исследования на тему "Методы уменьшения оже-рекомбинации в полупроводниковых инжекционных лазерах InGaAsSb/InAlGaAsSb" в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.011-96 «Патентные исследования». Охранных документов, которые могут препятствовать применению полученных результатов НИР на территории Российской Федерации, не обнаружено. Проведенный анализ полных текстов патентов не выявил технических решений, порочащих новизну результатов НИР, что подтверждает ее высокий технический уровень. Результаты проводимых НИР, касающиеся методов уменьшения оже-рекомбинации в полупроводниковых инжекционных лазерах InGaAsSb/InAlGaAsSb, носят фундаментальный характер и не являются охраноспособными на данном этапе исследований.

Приведённые выше результаты свидетельствуют о том, что финансирование по данному проекту позволило создать условия для улучшения качественного состава научных и научно-педагогических кадров; стимулировать приток молодежи в сферу науки и образования, а также закрепить молодежь в этой сфере.

Руководитель проекта



М.Я. Винниченко