

Аннотация отчета по проекту

«Наноматериалы и наноструктуры для источников и детекторов излучения среднего инфракрасного и терагерцового диапазонов»

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 № П284 от 29 апреля 2010 г.

Возрастающий в последнее время интерес к излучению среднего инфракрасного и терагерцового диапазонов излучению связан с широкими возможностями его применения в различных областях науки и техники, в частности, в медицине (диагностика и лечение), химии, физике, астрономии, а также в системах безопасности. Создание компактных и недорогих источников и детекторов излучения данного диапазона – актуальная задача современной науки и техники. Настоящий проект посвящен изучению физических свойств новых полупроводниковых наноматериалов (наноструктур), которые могут быть положены в основу принципа действия таких приборов.

Проведен аналитический обзор литературных источников по исследованию оптическими методами резонансных состояний примесей в наноматериалах со слоями нанометрового масштаба, по эмиссии излучения терагерцового диапазона из наноматериалов с квантовыми ямами на основе GaN и по фотопроводимости наноструктур в терагерцовом диапазоне.

Были получены следующие научные результаты.

Выращены наноструктуры с квантовыми ямами p -GaAs/AlGaAs, легированными бериллием. В данных структурах исследовались спектры поглощения поляризованного света среднего инфракрасного диапазона.

Исследования низкотемпературных равновесных спектров поглощения показали наличие сильного пика поглощения излучения s -поляризации с энергиями квантов около 200 мэВ и p -поляризации при энергиях кванта около 120 мэВ. С увеличением температуры происходит уширение обоих пиков и наблюдается небольшой сдвиг в область меньших энергий квантов.

Наблюдаемые спектральные особенности при низких температурах могут быть связаны с оптическими переходами дырок из основного состояния примеси в подзоны размерного квантования – вторую подзону тяжелых дырок hh_2 для p -поляризации, и третью подзону hh_3 для s -поляризации; а также в связанные с ними резонансные уровни примесного центра. При повышении температуры происходит частичная термическая

ионизация примесных центров и заполнение первой подзоны размерного квантования hh_1 , что приводит к дополнительному вкладу в поглощение оптических переходов из первой подзоны, которые обуславливают наблюдаемый с ростом температуры сдвиг пиков поглощения в область меньших энергий.

На основе полученных экспериментальных данных оценены энергии оптических переходов дырок из основного состояния примеси в резонансные состояния, находящиеся под второй и третьей подзонами размерного квантования, а также в сами эти подзоны. Получено хорошее согласие определенных из эксперимента положений подзон с расчетами: $hh_2 = 134$ мэВ и $hh_3 = 196$ мэВ (отсчет ведется от дна квантовой ямы). Положение третьей подзоны hh_3 практически совпадает с величиной разрыва валентных зон барьера и ямы, состояния этой подзоны можно считать делокализованными. Энергии связи резонансных состояний, находящихся под подзонами hh_2 и hh_3 , равными 19 мэВ.

Исследованы изменения спектра коэффициента поглощения структуры в сильном электрическом поле. В эксперименте измерялась величина увеличения пропускания структурой для излучения перестраиваемого по спектру CO_2 -лазера при подаче на образец импульсов сильного латерального электрического поля.

Экспериментальный спектр модуляции поглощения в области сильного равновесного поглощения света p -поляризации представляют собой узкий пик, положение которого соответствует переходам дырок из основного состояния бериллия в резонансное состояние, связанное с подзоной hh_2 . С ростом напряженности электрического поля спектральное положение пика остается неизменным, а величина модуляции поглощения в максимуме спектра монотонно сверхлинейно растет.

Полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что в сильных электрических полях происходят процессы частичной ионизации примесей электрическим полем, при этом уменьшается заселенность основного состояния бериллия, и, как следствие, уменьшается вклад в коэффициент поглощения оптических переходов из основного состояния бериллия в резонансное. Процесс примесного пробоя выражен на ВАХ в виде достаточно слабого отклонения зависимости от линейной, что связано с сильной зависимостью подвижности дырок от электрического поля.

Оценено время жизни дырок в резонансном состоянии под второй подзоной размерного квантования, которое определяется вкладом волновых функций первой подзоны в волновую функцию резонансного уровня.

Были выращены наногетероструктуры GaN/AlGaN с двумерным электронным газом (максимальная подвижность электронов достигала $5700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при температуре 4,2 К).

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 достаточно высоких электрических полях наблюдалось резкое снижение подвижности двумерных электронов, что является свидетельством их значительного разогрева.

Проведен теоретический расчет скорости потерь энергии горячими двумерными электронами в квантовой яме GaN/AlGaN с учетом рассеяния на акустических фононах через деформационный потенциал и пьезоэлектрические механизмы, а также с учетом рассеяния на полярных оптических фононах. С помощью уравнения баланса мощности определена полевая зависимость температуры горячих электронов для исследованной структуры. При температуре кристаллической решетки 4,2 К температура горячих электронов в электрическом поле около 4000 В/см достигала 400 К.

Экспериментально исследована эмиссия терагерцового излучения горячими двумерными электронами из гетероструктур GaN/AlGaN. Исследования проведены в спектральном диапазоне 2,2 – 7 ТГц при температуре кристаллической решетки 4,2 К в сильных электрических полях до 4000 В/см.

Проведены модельные теоретические расчеты спектров эмиссии терагерцового 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 температурах $T_e = 100 - 400$ К его положение соответствует терагерцовому диапазону частот.

Проведен модельный расчет полевой зависимости интегральной интенсивности терагерцового 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.

Были выращены микроstructures на основе эпитаксиальных слоев *n*-GaN с высоким уровнем легирования.

Экспериментально исследованы вольтамперные характеристики микроstructures *n*-GaN в широком диапазоне электрических поле для различных температур кристаллической решетки (4,2 – 300 К). ВАХ оказалась линейна во всем исследуемом диапазоне электрических полей для всех температур решетки, что объясняется высоким

уровнем легирования, который приводит к квантовому уширению примесных уровней и образованию примесной зоны, перекрывающейся с зоной проводимости.

Экспериментально исследована эмиссия терагерцового излучения из микроструктур *n*-GaN. Показано, что основной вклад в эмиссию дает тепловое излучение горячих электронов.

Было проведено сравнение интенсивности ТГц излучения 2D электронов в наногетероструктурах GaN/AlGaN и 3D электронов в микроструктурах *n*-GaN. Тепловое излучение 2D электронов оказалось интенсивнее. Это объясняется тем, что двумерные электроны, вследствие высокой подвижности, греются электрическим полем сильнее, чем трехмерные.

Были выращены наноструктуры с квантовыми ямами *n*-GaAs/AlGaAs, легированными кремнием, двух типов: для исследования спектров терагерцового излучения и фотопроводимости. В данных квантовых ямах был проведен расчет энергетического спектра электронов и примесей, согласно которому в энергетическом спектре примесных состояний появляются резонансные уровни, совпадающие по энергии с непрерывным спектром состояний первой подзоны размерного квантования (примесное состояние $2p_z$).

Для определения условий, в которых можно наблюдать ТГц излучение были исследованы вольтамперные характеристики образцов. В полях более 10 В/см при $T = 4,2$ К наблюдается примесный пробой. Терагерцовое излучение наблюдалось только в условиях примесного пробоя.

В спектрах ТГц излучения для напряженности поля $E = 34$ В/см доминирует линия с энергией кванта 13,6 мэВ. Согласно рассчитанному энергетическому спектру КЯ эта линия может быть связана с оптическими переходами горячих электронов из нижней подзоны размерного квантования на основное состояние примеси $1s$. Имеющиеся в спектре излучения слабые линии излучения с энергиями квантов менее 10 мэВ могут быть связаны с переходами электронов между локализованными состояниями примеси. С увеличением напряженности электрического поля основная линия излучения уширяется и немного сдвигается в область больших энергий кванта. Дополнительно появляются пики излучения вблизи энергий кванта 11,5 и 18,8 мэВ, которые могут быть связаны с переходами электронов из резонансного состояния $2p_z$ в локализованные состояния примеси $2s$ и $1s$.

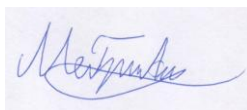
В спектре фотопроводимости при возбуждении светом *s*-поляризации присутствует широкий пик вблизи энергии фотона 9 мэВ, связанный с поглощением света на переходах из основного состояния примеси в первую подзону размерного квантования ($1s - 1$).

Положение этого пика близко к расчетному значению энергии (8,8 мэВ). В спектральной зависимости фототока при возбуждении светом p -поляризации помимо пика $1s - 1$ обнаружен пик вблизи энергии 18,8 мэВ, связанный с поглощением света, поляризованного вдоль оси роста структуры. Спектральное положение и поляризационная зависимость этого пика указывают на то, что он может быть связан с переходами $1s - 2p_z$. Наличие фототока в этой спектральной области, главным образом, для света p -поляризации объясняется тем, что волновая функция резонансного состояния $2p_z$ сформирована, в основном, волновыми функциями второй подзоны размерного квантования.

Таким образом, задачи, поставленные в проекте, выполнены полностью. 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.

Исследованные в проекте новые явления, связанные с оптическими переходами электронов с участием резонансных примесных состояний, а также явления связанные с оптическими свойствами горячих электронов в микро- и наноструктурах могут быть использованы для разработки источников и приемников излучения среднего инфракрасного и терагерцового диапазонов.

Руководитель проекта



/Мелентьев Г.А./