


На правах рукописи



БАКШАЕВ Илья Олегович

ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКАЯ АБСОРБЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР

(Специальность 01.04.10 - физика полупроводников)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Портной Ефим Лазаревич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор (СПбГПУ) Воробьев Леонид Евгеньевич

доктор физико-математических наук,

профессор (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) Васютинский Олег Святославович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)

Защита состоится 24.11.2011 в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан 24 октября 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

 Л. М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время активно развивается новое направление научных исследований – интегральная нанофотоника. Это направление возникло на стыке интегральной оптики и физики наногетероструктур и занимается исследованием и применением процессов генерации, распространения и поглощения света в волноводных гетероструктурах, содержащих квантоворазмерные элементы, такие как, например, квантовые ямы (КЯ) и квантовые точки (КТ).

Одно из перспективных направлений интегральной нанофотоники – микроволновая фотоника, которая подразумевает создание элементной базы для изготовления устройств волоконно-оптической и беспроводной связи на основе использования оптических элементов для формирования модулированного СВЧ-сигнала [1]. Преимущества данной концепции состоят в возможности получения электромагнитного излучения любых частот дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов из оптического излучения, модулированного на этих частотах, с возможностью усиления по оптической частоте с высоким КПД и низкими потерями.

Хорошо известно, что для изготовления приемо-передающих устройств необходимо наличие таких важнейших функциональных элементов, как генератор (гетеродин) и модулятор. Если говорить об этих элементах с точки зрения интегральной нанофотоники, генератором и гетеродином может стать лазер, работающий в режиме генерации коротких оптических импульсов, таком как синхронизация мод [2] или модуляция добротности [3]. Для реализации этих режимов необходимо наличие помимо источника лазерного излучения, ещё и насыщающегося поглотителя [4]. Совершенно очевидно, что для четкого понимания физических принципов функционирования насыщающегося поглотителя и оптимизации его работы необходимо подробное исследование особенностей поглощения.

Для работы амплитудного, частотного и фазового модулятора могут быть использованы принципы быстрого изменения поглощения в полупроводниковых наногетероструктурах, например, за счет квантоворазмерного эффекта Штарка [5].

Из этих соображений становится понятно, что необходимость определения с высокой точностью абсолютного коэффициента поглощения и особенностей его изменения под действием поля является актуальной задачей при разработке светоизлучающих и поглощающих приборов на основе полупроводниковых волноводных наногетероструктур. Эти вопросы решаются методами абсорбционной спектроскопии (АС).

С помощью АС можно эффективно выполнить следующие задачи:

1. Определение энергии и характера оптических переходов в образце по поглощению, тем самым объясняя механизмы лазерной генерации в гетероструктуре: количество, характер и поляризацию мод в резонаторе, длины волн генерации, ширину и форму спектра, динамику изменений спектральных характеристик в зависимости от поля, температуры, токов накачки и т.д.

2. Выявление особенностей спектра, напряженности электрического поля и других параметров системы, при которых возникают условия в насыщающемся поглотителе, необходимые для существования стабильных режимов модуляции добротности (МД) и синхронизации мод (СМ).

3. Исследование возможностей совместного эффективного существования модуляции поглощением и режимов генерации коротких световых импульсов в специальной трехсекционной конструкции излучателя «лазер-модулятор», предложенной в диссертации.

4. Обсуждение необходимости и возможности интегрирования в конструкцию излучателя спектрально-селективного элемента – распределенного брэгговского отражателя (РБО), для улучшения эффективности работы интегрально-оптических устройств.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование особенностей поглощения света в полупроводниковых гетероэпитаксиальных волноводах, содержащих квантоворазмерные наноструктуры, методом интегрально-оптической абсорбционной спектроскопии, направленное на создание новых элементов и устройств интегральной нанофотоники.

Научная новизна

1. Продемонстрировано, что метод интегрально-оптической абсорбционной спектроскопии (ИОАС) позволяет с высокой точностью исследовать особенности поглощения полупроводниковых волноводных наногетероструктур с КТ и КЯ при комнатной температуре.

2. В гетероструктуре с напряженной InGaAs/GaAs квантовой ямой в расширенном волноводе при комнатной температуре наблюдался квадратичный эффект Штарка для трех оптических переходов, два из которых являются запрещенными при нулевом поле. Переход с 1-го уровня тяжелых дырок на основной электронный уровень является экситонным в широком интервале полей. Экспериментально и теоретически показано, что за счет напряжения сжатия в плоскости гетероструктуры уровень легких дырок сдвинут более чем на 100 мэВ относительно тяжелых дырок в коротковолновую область.

3. В полупроводниковых гетероструктурах с 10 слоями несвязанных InAs/InGaAs КТ наблюдался линейно-квадратичный эффект Штарка при комнатной

температуре. Измеренный штарковский сдвиг под воздействием поля соответствует результатам, полученным другими авторами при температуре жидкого гелия [6].

4. Исследованы особенности поглощения структуры с 3-ми слоями связанных InGaAs/GaAs квантовых точек. Построена модель, описывающая поведение поглощения в этих структурах, основанная на разнице в размерах КТ в соответствующих слоях. Спектр дифференциального поглощения имеет 3 максимума, что обусловлено существованием в диапазоне измерений 1-го прямого и 2-х не прямых оптических переходов, возникающих из-за туннельного связывания КТ.

5. Впервые предложена модель интегрально-оптического источника модулированного оптического сигнала, излучающего короткие световые импульсы с частотой повторения, соответствующей субмиллиметровому и миллиметровому диапазону длин волн. В качестве генератора выступает лазер с СМ, в качестве модулятора – поглотитель на эффекте Штарка, вместе образующие трехсекционную конструкцию излучателя.

6. Путем компьютерного моделирования продемонстрирована возможность эффективной амплитудной и частотной модуляции в гетероструктурах с КЯ и КТ на основе эффекта Штарка. Показано, что эффективная модуляция достигается в гетероструктуре с одиночной КЯ, исследуемой в работе, и в идеальном случае может быть экспериментально обнаружена даже без использования спектрально-селективного элемента.

Практическая значимость

Предложенный метод ИОАС позволяет точно и эффективно исследовать поглощающие свойства квантоворазмерных объектов внутри волноводных гетероструктур даже при комнатной температуре. Использование ИОАС особенно удобно при проведении экспериментов с потенциально приборными гетероструктурами.

Произведенные исследования поглощающих свойств полупроводниковых наногетероструктур позволяют более точно понимать их физические свойства, как в процессах генерации сигналов, так и при модуляции поглощением.

Результаты экспериментов могут быть использованы при разработке многосекционных лазеров, работающих в режиме синхронизации мод или модуляции добротности. Для этих применений были получены параметры насыщающегося поглотителя при различных обратных напряжениях, что объясняет динамику работы лазеров в режимах генерации коротких оптических импульсов и позволяет определять оптимальные параметры для изготовления опытных образцов оптических генераторов тактовой частоты.

Продемонстрирован метод амплитудной и частотной модуляции, основанный на плавном изменении абсолютного коэффициента поглощения в реальной

гетероструктуре с одиночной КЯ. В приведенных экспериментах изменение поглощения является быстрым процессом, что может позволить получить полосу модуляции в несколько десятков ГГц и выше.

В целом, полученные данные могут позволить создать элементную базу принципиально новых устройств микроволновой фотоники.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод интегрально-оптической абсорбционной спектроскопии позволяет с высокой точностью исследовать особенности поглощения и динамику его изменения от поля в полупроводниковых волноводных наногетероструктурах.

2. В напряженной InGaAs/GaAs квантовой яме с расширенным асимметричным волноводом наблюдается экситонный характер края поглощения с квадратичным эффектом Штарка при комнатной температуре. При увеличении поля проявляются переходы со 2-го и 3-го уровня тяжелых дырок на основной электронный уровень, которые при нулевом поле являются запрещенными.

3. В гетероструктурах с 10-ю слоями InAs/InGaAs несвязанных квантовых точек обнаружен эффект Штарка при комнатной температуре. При полях до 132 кВ/см эффект является линейным, при дальнейшем увеличении поля становится квадратичным.

4. В гетероструктурах с 3-мя слоями InGaAs/GaAs квантовых точек с тонкими барьерами между ними имеет место их туннельное связывание, проявляющееся в виде наличия непрямых оптических переходов между соседними КТ, отличающимися размерами.

5. Излучение лазеров с пассивной СМ на основе гетероструктуры с одиночной КЯ в расширенном волноводе может эффективно модулироваться по частоте и амплитуде поглотителем на эффекте Штарка на основе той же гетероструктуры.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Семинары лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.
- Конференция «Неделя науки СПбГПУ», 2006, Санкт-Петербург.
- VIII всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 2006, Санкт-Петербург.
- XI международный симпозиум «Наноп физика и наноэлектроника», 2007, Нижний Новгород.
- Laser Optics 2008, Saint-Petersburg, Russia.
- Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», 2008, Санкт-Петербург.

- 29th International Conference on the Physics of Semiconductors 2008, Rio de Janeiro, Brazil.
- XIII Международный Симпозиум "Нанозфизика и нанозлектроника", 2009, Нижний Новгород.
- Semiconductor and Integrated Opto-Electronics Conference 2009, Cardiff, Wales, UK.
- European Semiconductor Laser Workshop 2009 (ESLW-2009), Vienna, Austria.
- Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, 2009, Москва.
- 18th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", 2010, Saint- Petersburg, Russia.
- 2-й Симпозиум "Полупроводниковые лазеры: физика и технология", 2010, Санкт-Петербург.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 6 – в статьях в реферируемых журналах, 12 – в тезисах научных конференций, 1 – в материалах патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 67 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 51 наименования. Общий объем диссертационной работы составляет 98 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

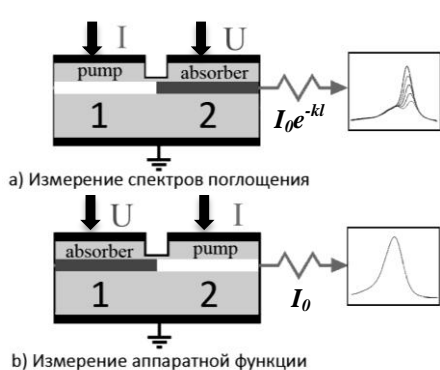
Во **введении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая значимость работы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию методики абсорбционной спектроскопии, начиная с теоретических основ и определения требований к экспериментальной установке для исследования поглощения.

Описывается работа классической абсорбционной спектроскопии [7, 8], в которой специально для эксперимента выращивается гетероструктура с большим количеством слоев изучаемых квантовых объектов для достижения необходимого уровня поглощения, который можно будет детектировать. В исследованиях такие образцы просвечиваются специально подобранным для этой гетероструктуры источником излучения вдоль оси роста (поперек слоев), прошедший свет детектируется с помощью спектроанализатора. Стоит отметить, что обычно эксперимент проводится при температуре жидкого гелия.

В противовес этой методике в данной главе предлагается к использованию метод интегрально-оптической абсорбционной спектроскопии, который подразумевает исследование квантоворазмерных объектов, находящихся внутри

волноводных гетероструктур, при комнатной температуре. Данным методом могут исследоваться потенциально приборные светоизлучающие и поглощающие гетероструктуры, нет необходимости изготавливать специальные многослойные образцы. В диссертации этим методом исследовались лазерные гетероструктуры с КЯ и КТ, работающие, в том числе, в режимах МД и СМ.



а) Измерение спектров поглощения

б) Измерение аппаратной функции

Рис. 1 Электрическая схема подключения двухсекционных опытных образцов для измерения спектров люминесценции после (а) и до поглощения (б).

Далее в главе подробно описываются особенности предложенного метода. Для экспериментов изготавливаются двухсекционные опытные образцы с одинаковыми длинами секций, которые разделены зазором в электрическом контакте, тем самым обеспечивая независимость накачки. Единый волновод при этом не затрагивается. Если подать на секцию прямое смещение, через гетероструктуру потечет ток, и секция будет работать в качестве источника излучения. При приложении обратного напряжения в гетероструктуре появляется

электрическое поле, направленное вдоль оси роста, которое выносит носители после межзонного поглощения, т.е. секция превращается в поглотитель. Таким образом, свет с излучателя попадает по волноводу в секцию поглотителя, где осуществляется его поглощение. Меняя контакты местами, можно детектировать спектр излучения как после поглощения (Рис. 1, а), так и до него (Рис. 1, б). Подставив полученные спектры в закон Бугера, экспериментатор получает спектр поглощения в абсолютном масштабе за счет симметричности конструкции. Отмечается, что установка работает в однопроходном режиме с током накачки значительно ниже порога генерации.

В соответствующем подразделе теоретически обосновывается метод дифференциальной ИОАС, который позволяет аппаратно определять производную абсолютного поглощения по напряжению. Это особенно актуально в случае сложной зависимости поглощения от поля, а также когда само изменение незначительно по сравнению с интенсивностью недифференцированного сигнала.

Во **второй главе** описывается исследование методом ИОАС гетероструктуры с одиночной напряженной $\text{In}_{0,26}\text{Ga}_{0,74}\text{As}/\text{GaAs}$ КЯ в расширенном асимметричном волноводе. В начале главы обосновывается выбор объекта исследования, приводится подробное описание структуры и параметров создания двухсекционных лазерных образцов. Толщина КЯ составляла около 9 нм, тогда как ширина волновода равнялась 1.7 мкм.

Далее в главе приводятся результаты экспериментов по измерению ТЕ- и ТМ-поляризованных составляющих спектров люминесценции до и после поглощения при разных приложенных обратных напряжениях на секции поглотителя. Путем обработки полученных данных были вычислены спектры поглощения в абсолютном масштабе (Рис. 2). Наблюдается квадратичный эффект Штарка со сдвигом пика поглощения, в среднем равным 0.23 мэВ/(кВ/см). Продемонстрировано наличие 3-х пиков поглощения, которые показывают наличие соответствующего количества оптических переходов в гетероструктуре. Первый переход обладает ярко выраженным экситонным характером, два других являются запрещенными при нулевом поле, поскольку проявляются только при приложении напряжения. Отсюда в диссертации делается предположение о том, что на спектрах наблюдаются оптические переходы с 1, 2 и 3-го уровня тяжелых дырок на основной электронный уровень. Приведенный в соответствующем подразделе подробный теоретический расчет напряженной КЯ полностью подтвердил данное предположение. Он также показал, что уровень легких дырок сдвинут более чем на 100 мэВ от уровня тяжелых, что объясняется как размерным квантованием, так и наличием напряжения сжатия в InGaAs КЯ. Данное утверждение подтверждается экспериментальными данными ТМ-составляющей поглощения. Отмечается, что по той же самой причине интенсивность ТЕ поляризации более чем на порядок выше, чем ТМ. Приведенная зонная диаграмма демонстрирует наличие одного электронного уровня в зоне проводимости, 5-ти уровней тяжелых и 2-х уровней легких дырок в валентной зоне.

В третьей главе описывается исследование полупроводниковой лазерной гетероструктуры с 10-ю слоями InAs/InGaAs КТ. В начале главы приводятся обоснование выбора объекта исследования, а также конфигурация лазерной структуры и параметры создания двухсекционных опытных образцов.

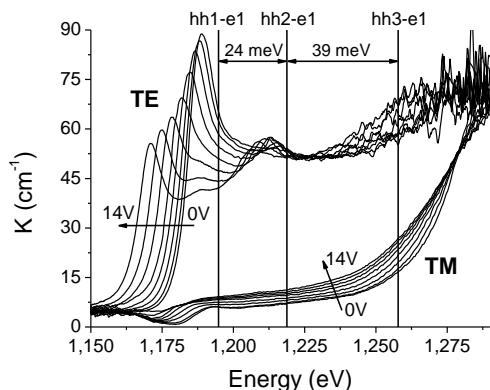


Рис. 2 Вычисленное теоретически положение оптических переходов на экспериментальном спектре поглощения в абсолютном масштабе.

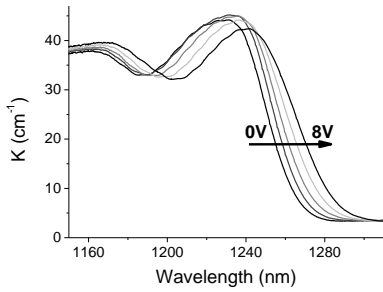


Рис. 3 Спектры абсолютного коэффициента поглощения.

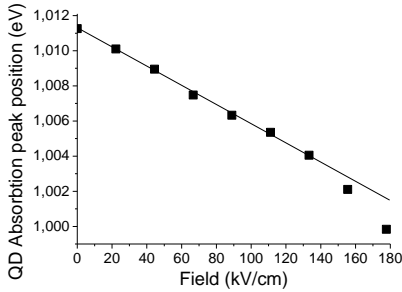


Рис. 4 Зависимость положения пика поглощения от поля.

линейным, при дальнейшем увеличении поля становится квадратичным (Рис. 4). В литературе [9] уже упоминался смешанный линейно-квадратичный эффект Штарка на КТ, поэтому полученные результаты не являются неожиданными. Кроме того, величина сдвига для линейного участка соответствуют полученным результатам других авторов [6] для одиночных КТ при температуре жидкого гелия. Это демонстрирует хорошую применимость предложенного метода ИОАС для КТ даже при комнатной температуре.

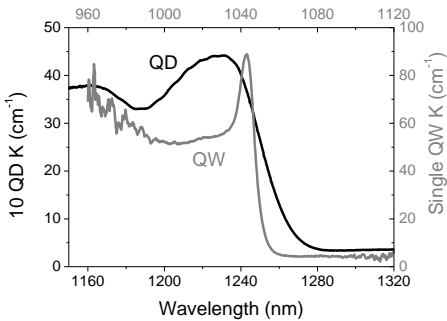


Рис. 5 Сравнение спектров коэффициентов поглощения гетероструктур с КТ и КЯ. Кривые совмещены сдвигом на 200 нм.

Демонстрируются спектры люминесценции до и после поглощения при обратных напряжениях от 0 до 8 В на поглотителе. Так же как и в структуре с одиночной КЯ, интенсивность ТЕ-поляризации примерно в 10 раз выше, чем ТМ из-за наличия механических напряжений в материале КТ. Пик люминесценции при увеличении поля значительно падает по интенсивности и смещается в длинноволновую область. Далее приводятся обработанные графики спектров поглощения в абсолютном масштабе (Рис. 3). Два пика, видимые на спектре поглощения, соответствуют переходу на основной и возбужденный электронный уровень с уровня тяжелых дырок. Наблюдается четкий эффект Штарка при комнатной температуре. При полях до 132 кВ/см эффект является

В соответствующем подразделе приводится сравнение результатов по поглощению, полученные для КТ и КЯ (Рис. 5). На основе этих данных, была выявлена дисперсия размеров КТ, оцененная авторами работы [10] в 11 %. Также показано, что штарковский сдвиг для КТ в 4 раза менее интенсивный, чем для КЯ, поэтому для модуляции поглощением целесообразно использовать именно последние гетероструктуры.

В четвертой главе приводятся результаты исследований гетероструктуры с 3-мя слоями связанных InGaAs/GaAs КТ. В начале главы обосновывается выбор объекта исследования, приводится подробное описание структуры, параметров создания двухсекционных лазерных образцов. Приводятся снимки с электронного микроскопа, демонстрирующие вертикальное выравнивание КТ, а также увеличение размеров КТ вдоль оси самовыстраивания. Последнее наблюдение приводит к тому, что верхние КТ с большим размером и более широким расстоянием между барьерами (обозначенные на Рис. 6 как QD1) имеют более глубокое залегание уровней и, следовательно, меньшую энергию перехода в основное состояние, чем у нижних (меньших) КТ (QD2 и QD3).

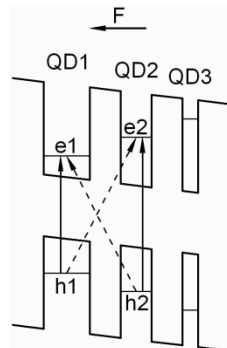


Рис. 6 Три связанных КТ разного размера при приложении поля.

Приводятся спектры люминесценции до и после поглощения при разных обратных напряжениях на секции поглотителя. Исходя из этих результатов, строятся соответствующие спектры поглощения. Изменения поглощения имеют различный характер в разных местах спектра и по ним очень сложно сделать вывод о процессах, происходящих в гетероструктуре.

В связи с этим, в работе приводятся спектры дифференциального поглощения. Приведен и обоснован способ анализа оптических переходов по экстремумам и нулям графиков дифференциального поглощения, полученных методом ИОАС. На спектрах наблюдается от 2-х до 3-х пиков одновременно, что говорит о существовании в области наблюдения такого же количества оптических переходов. Их необычное поведение позволило сделать предположение, что из-за близкого расстояния между слоями КТ (3 нм) становится возможным их туннельное связывание, при котором интеграл перекрытия волновых функций электронных состояний становится отличным от нуля. В результате появляется вероятность существования помимо прямых (сплошные линии на Рис. 6), ещё и непрямых оптических переходов электронов в соседние КТ в стопках (пунктирные линии на Рис. 6). Анализ характера изменения энергии переходов применительно к данной модели показал, что обнаружены 1 прямой (h1-e1) и 2 непрямых (h2-e1, h1-e2) перехода в 2-х соседних КТ большего размера, тем самым подтверждая предположение о туннельном связывании КТ. Остальные переходы

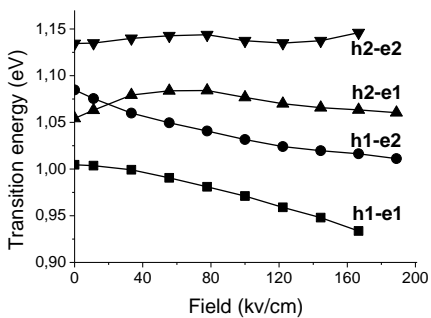


Рис. 7 Положения энергий оптических переходов в зависимости от поля.

экспериментально не были обнаружены из-за ограниченности области измерений шумами.

В работе показывается момент резонанса энергий двух непрямых оптических переходов при значении поля 20 кВ/см в тот момент, когда разница положений электронных уровней равна разнице положений дырочных в соседних КТ. Построен график зависимости энергий 4-х оптических переходов от поля (Рис. 7). Энергия 2-го прямого перехода ($h2-e2$) была вычислена по значениям энергий экспериментально обнаруженных переходов.

В **пятой главе** описывается одно из возможных практических применений результатов диссертации. Отмечается, что в двухсекционном лазере, изготовленном

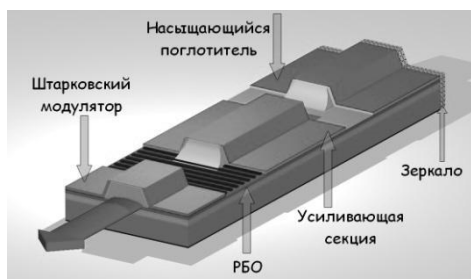


Рис. 8 Трехсекционный макетный образец: лазер с синхронизацией мод + модулятор на эффекте Штарка.

на основе гетероструктуры с КЯ, описанной в Главе 2, был успешно реализован режим СМ с частотой 12.3 ГГц [11]. В связи с этим, предлагается к двухсекционному лазеру с СМ добавить ещё одну независимую секцию поглотителя, который будет менять свои свойства (коэффициент поглощения) при изменении внешнего поля (обратного напряжения) под действием эффекта Штарка. В результате получается, что высокочастотные оптические импульсы, выходящие из двухсекционного лазера с СМ, попадают в поглотитель, который осуществляет модуляцию поглощением. Данную идею теоретически можно реализовать в специальной трехсекционной конструкции источника (Рис. 8).

Далее в данной главе производится компьютерное моделирование работы предложенной модели в среде MatLab. Основная задача – определить возможность совместной работы режима СМ и амплитудно-частотной модуляции поглощением за счет эффекта Штарка на длине волны СМ. Входные данные взяты из реальных экспериментальных результатов гетероструктуры с КЯ. Дополнительно рассматривается вопрос целесообразности интеграции в трехсекционную конструкцию спектрально селективного элемента РБО, который может совместить длину волны генерации при СМ с максимумом штарковской модуляции и тем самым повысить эффективность работы элементов. Замечено, что вопрос стыковки элементов конструкции при моделировании не учитывался.

В продолжении главы продемонстрировано создание компьютерной модели режима СМ на основе 10 синфазных гармоник существующих в резонаторе Фабри-Перо. Показано, что графический результат суперпозиции гармоник – построенная последовательность коротких оптических импульсов на частоте 12 ГГц хорошо

согласуется с экспериментальными результатами СМ. Далее производится моделирование работы поглотителя, при приложении к нему синусоидального обратного напряжения с частотой 500 МГц. Иллюстрация модуляции световых импульсов СМ представлены на Рис. 9. Показаны высокочастотные короткие импульсы СМ, модулированные по амплитуде. Форма огибающей соответствует закону Бугера с модулированным коэффициентом поглощения в показателе экспоненты. На радиочастотном спектре (Рис. 10) наблюдается появление двух боковых гармоник, соответствующих суммарной и разностной частотам. Таким же образом демонстрируется возможность частотной модуляции, при которой радиочастотный спектр уширяется, и появляются дополнительные боковые гармоники.

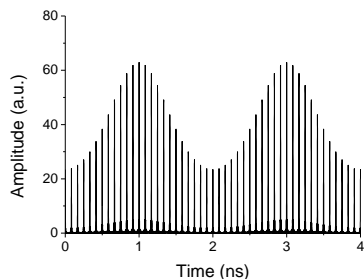


Рис. 9 Сигнал лазера с СМ, модулированный по амплитуде.

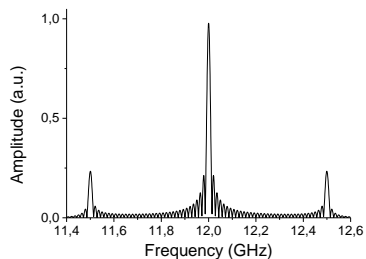


Рис. 10 РЧ спектр амплитудно-модулированного сигнала СМ.

Также в главе рассматривается вопрос эффективности модуляции в зависимости от длины поглотителя при заданной длине волны СМ. Показано, что оптимальная длина поглотителя однозначно определяется расчетом и позволяет соблюсти баланс всех заданных в модели параметров, отвечающих за эффективность детектирования модулированной составляющей сигнала.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы под номерами соответствующих глав:

1. Интегрально-оптический подход в абсорбционной спектроскопии позволяет точно и эффективно исследовать поглощающие свойства квантоворазмерных объектов внутри волновода даже при комнатной температуре. Использование ИОАС особенно удобно при проведении экспериментов с потенциально приборными гетероструктурами.

Метод дифференциальной ИОАС позволяет с высокой точностью определить особенности изменения поглощения в случае его сложной зависимости от поля, а также когда само изменение поглощения незначительно по сравнению с интенсивностью недифференцированного сигнала.

2. В гетероструктуре с напряженной InGaAs/GaAs квантовой ямой в расширенном асимметричном волноводе наблюдается квадратичный эффект Штарка при комнатной температуре.

Показан ярко выраженный экситонный характер основного оптического перехода с 1-го уровня тяжелых дырок на основной электронный уровень. В присутствии поля выявлены оптические переходы со 2-го и 3-го уровней тяжелых дырок, которые при его отсутствии являются запрещенными.

Проведен теоретический расчет зонной структуры напряженной КЯ, совпавший по положениям оптических переходов с экспериментальными данными.

3. В гетероструктурах с 10-ю слоями InAs/InGaAs квантовых точек наблюдается отчетливый эффект Штарка при комнатной температуре. При полях до 132 кВ/см эффект является линейным, при дальнейшем увеличении становится квадратичным.

В спектры излучения основной вклад вносит ТЕ поляризованная составляющая излучения, поскольку из-за внутренних напряжений в материале КТ уровень легких дырок смещается в сторону высоких энергий, и излучение в длинноволновой области идет через уровень тяжелых дырок.

Путем сравнения экспериментальных данных по поглощению в КЯ и КТ обнаружена дисперсия размеров КТ, оцененная теоретически в 11%. Реакция пика поглощения на поле в КТ равна 0,056 мэВ/(кВ/см). Это значение в 4 раза меньше, чем в гетероструктуре с одиночной КЯ.

4. В гетероструктурах с 3-мя слоями связанных КТ наблюдается эффект Штарка при комнатной температуре.

Выявлена дисперсия поперечных размеров КТ в стопках, которая приводит к различию положений электронных и дырочных энергетических уровней в слоях КТ.

Показан способ анализа характера оптических переходов по экстремумам и нулям графиков дифференциального поглощения, полученных методом ИОАС.

Подтверждено туннельное связывание КТ в соседних слоях, исходя из наличия непрямых оптических переходов с характерным поведением, отличным от несвязанных КТ, под воздействием поля.

Построены зависимости энергий первых 4-х оптических переходов от величины внутреннего поля в диапазоне от 0 до 190 кВ/см. Обнаружен резонанс энергий непрямых оптических переходов при значении поля 20 кВ/см.

5. Разработана модель интегрально-оптического источника модулированного оптического сигнала, излучающего короткие световые импульсы в субмиллиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн. В качестве генератора выступает лазер с СМ, в качестве модулятора – поглотитель на эффекте Штарка, вместе образующие трехсекционную конструкцию излучателя. Между элементами может быть интегрирован спектрально-селективный элемент (РБО) для повышения эффективности совместной работы лазера и модулятора.

Путем компьютерного моделирования продемонстрирована возможность амплитудной и частотной модуляции в гетероструктурах с КЯ и КТ, на основе

эффекта Штарка. Показано, что эффективная модуляция достигается в гетероструктуре с одиночной КЯ и в идеальном случае может быть экспериментально обнаружена даже без использования спектрально-селективного элемента.

Выявлено, что за эффективность и КПД модуляции отвечают два основных фактора: диапазон изменения поглощения и его минимальный уровень в той части спектра, где находится опорный сигнал оптического генератора.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бакшаев И.О., Портной Е.Л. Особенности поглощения света в двухсекционных лазерах на квантовых точках // Конференция «Неделя науки». – СПбГПУ. – 2006. – Санкт-Петербург.

2. Бакшаев И.О., Портной Е.Л. Особенности поглощения света в двухсекционных лазерах на квантовых точках // VIII всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. – 2006. – Санкт-Петербург.

3. Портной Е.Л., Гаджиев И.М., Губенко А.Е., Соболев М.М., Ковш А.Р., Бакшаев И.О. Поляризационная зависимость сдвига Штарка в поглощении в InGaAs/GaAs лазерных структурах с квантовыми точками // Письма в ЖТФ. – 2007. Т. 33. – Вып. 16. – С.28.

4. Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Портной Е.Л., Соболев М.М. Особенности эффекта Штарка в двухсекционном лазере с квантовыми точками // XI международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника». – 2007. – Нижний Новгород.

5. Gadjeiev I.M., Buyalo M.S., Bakshaev I.O., Portnoi E.L. High product value of average power and repetition frequency in QD laser diode // Laser Optics 2008. – 2008. – Saint-Petersburg.

6. Бакшаев И.О., Буяло М.С., Гаджиев И.М., Григорьев Р.И., Портной Е.Л. Гетеролазеры с синхронизацией мод в микроволновой фотонике // Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». – 2008. – Санкт-Петербург.

7. Portnoi E., Gadzhiev I., Sobolev M., Bakshaev I., Mikhurin V., Nevedomskiy V., Buyalo M., Zadiranov Yu. Field-controlled resonance absorption in vertically correlated systems of InAs/GaAs quantum dots at room temperature // 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-2008). – 2008. – Rio de Janeiro. – Brazil.

8. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Михрин В.С., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М., Портной Е.Л. Поглощение в лазерных структурах со связанными и несвязанными квантовыми точками в электрической поле при комнатной температуре // ФТП. – 2009. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 512.

9. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Михрин В.С., Портной Е.Л. Туннельное связывание электронных состояний в вертикально коррелированных

системах InAsGa/GaAs квантовых точек при комнатной температуре // Материалы XIII Международного Симпозиума "Нанозфизика и нанозлектроника". – 2009. – Н.Новгород.

10. Bakshaev I.O., Buyalo M.S., Gaqdjiev I.M., Portnoi E.L., Gubenko A.E., Kovsh A.R. Multi-section saturable absorber design for mode-locking of monolithic QD lasers with high power pulses // Semiconductor and Integrated Opto-Electronics Conference (SIOE 2009) . – 2009. – Cardiff. – Wales. – UK.

11. Gadzhiev I.M., Buyalo M.S., Bakshaev I.O., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A., Leshko A.Yu., Lyutetskiy A.V., Tarasov I.S., Portnoi E.L. Mode-locking peculiarities in broadened-waveguide QW laser diodes // European Semiconductor Laser Workshop. – 2009. – Vienna. – Austria.

12. Nikolaev V. V., Averkiev N. S., Sobolev M. M., Gadzhiev I. M., Bakshaev I. O., Buyalo M. S., Portnoi E. L. Tunnel coupling in an ensemble of vertically aligned quantum dots at room temperature // Phys. Rev. B. – 2009. – V. 80. – P. 205304.

13. Гаджиев И. М., Буяло М. С., Бакшаев И. О., Григорьев Р.И., Слипченко С.О., Пихтин Н. А., Лешко А. Ю., Лютецкий А. В., Винокуров Д.А., Тарасов И. С., Портной Е. Л. Особенности синхронизации мод в лазерах с квантовой ямой в широком волноводном слое // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – Вып. 22. – С.29.

14. Gadzhiev I.M., Buyalo M. S., Bakshaev I. O., Slipchenko S. O., Pikhtin N. A., Leshko A. Yu., Lyutetskiy A. V., Tarasov I. S., E. L. Portnoi Mode-locked broadened-waveguide SQW GaInAs laser diode with improved stability // 18th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". – 2010. – Saint-Petersburg. – Russia.

15. Бакшаев И.О., Буяло М.С., Гаджиев И.М., Григорьев Р.И., Портной Е.Л. Особенности пассивной синхронизации мод в интегрально-оптических устройствах на основе гетерозепитаксиальных волноводов, содержащих квантовые точки и квантовые ямы // Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. – 2009. – Москва.

16. И.О. Бакшаев, И.М. Гаджиев, Е.Л. Портной, Интегрально-оптическая дифференциальная абсорбционная спектроскопия наногетероструктур // 2-й Симпозиум "Полупроводниковые лазеры: физика и технология". – 2010. – Санкт-Петербург.

17. Портной Е.Л., Гаджиев И.М., Соболев М.М., Бакшаев И.О. Двухсекционный лазер // Патент РФ № 2383093. – 27.02.2010.

18. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М., Портной Е.Л. Оптическое поглощение в сверхрешетках квантовых точек InAs/GaAs в электрическом поле при комнатной температуре // ФТП. – 2011. – Т.45. – Вып. 8. – С. 1095.

19. Соболев М.М., Гаджиев И.М., Бакшаев И.О., Неведомский В.Н., Буяло М.С., Задиранов Ю.М., Золотарева Р.В., Портной Е.Л. Поляризационные

зависимости электролюминесценции и поглощения вертикально-коррелированных InAs/GaAs-квантовых точек // ФТП. – 2012. – Т. 46. – Вып. 1.

Список цитируемой литературы

- [1] Бакшаев И.О., Буяло М.С., Гаджиев И.М., Григорьев Р.И., Портной Е.Л. Гетеролазеры с синхронизацией мод в микроволновой фотонике // Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». – 2008. – Санкт-Петербург.
- [2] Avrutin E.A., Marsh J.H., Portnoi E.L. Monolithic and multi-GigaHertz mode-locked semiconductor lasers: Constructions, experiments, models and applications // IEE Proc.-Optoelectron. – 2000. – V. 147. – N. 4.
- [3] Vasil'ev P., White I., Gowar J. Fast phenomena in semiconductor lasers // Rep. Prog. Phys. – 2000. – V. 63. – N. 12. – P. 1997.
- [4] Bakshaev I.O., Buyalo M.S., Gadjiev I.M., Portnoi E.L., Gubenko A.E., Kovsh A.R. Multi-section saturable absorber design for mode-locking of monolithic QD lasers with high power pulses // Semiconductor and Integrated Opto-Electronics Conference (SIOE 2009) . – 2009. – Cardiff. – Wales. – UK.
- [5] Карпович И.А., Горшков А.П., Байдусь Н.В. Исследование эффекта Штарка на экситонах в квантовой яме InGaAs/GaAs методом фотоэлектрической спектроскопии в системе полупроводник/электролит // Труды 2-го совещания по проекту НАТО SfP-973799. – Semiconductors. – 2002. – Нижний Новгород.
- [6] Bennett A. J., Patel R. B., Skiba-Szymanska J., Nicoll C. A., Farrer I., Ritchie D. A., Shields A. J. Giant Stark effect in the emission of single semiconductor quantum dots // Appl. Phys. Lett. – 2010. – V. 97. – P. 031104.
- [7] Morgan R. Improvements in Self Electro-optic Effect Devices: Toward System Implementation // Devices for Optical Processing. – SPIE. – 1991. – V. 1562. – P. 213.
- [8] Kroner M., Weiss K., Biedermann B., Seidl S., Manus S., Holleitner A., Badolato A., Petroff P., Gerardot B., Warburton R., Karrai K. Optical Detection of Single-Electron Spin Resonance in a Quantum Dot // Phys. Rev. Lett. – 2008. – PRL 100. – P. 156803.
- [9] Robinson J. W., Rice J. H., Lee K. H., Na J. H., Taylor R.A., Hasko D. G., Oliver R. A., Kappers M. J., Humphreys C. J., Briggs G. A. D. Quantum-confined Stark effect in a single InGaN quantum dot under a lateral electric field // Appl. Phys. Lett. – 2005. – V. 86. – P. 213103.
- [10] Nikolaev V. V., Averkiev N. S. Relation between size dispersion and line shape in quantum dot ensembles // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 95. – P. 263107.
- [11] Гаджиев И. М., Буяло М. С., Бакшаев И. О., Григорьев Р.И., Слипченко С.О., Пихтин Н. А., Лешко А. Ю., Лютецкий А. В., Винокуров Д.А., Тарасов И. С., Портной Е. Л. Особенности синхронизации мод в лазерах с квантовой ямой в широком волноводном слое // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – Вып. 22. – С.29.