

На правах рукописи

ЗЕРОВА Вера Львовна

**ВНУТРИЗОННЫЕ ИНВЕРСИЯ НАСЕЛЕННОСТИ И ПОГЛОЩЕНИЕ
ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
В КВАНТОВЫХ ЯМАХ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $A^{III}B^V$**

Специальность: 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Воробьев Леонид Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
Агемян Вадим Фадеевич

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Торопов Алексей Акимович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет

Защита состоится 01 июня 2006 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан 25 апреля 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01
доктор технических наук, профессор

Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Интерес к оптическим исследованиям наноструктур в последние годы вызван возможностью наблюдения принципиально новых физических явлений и созданием новых оптоэлектронных приборов (квантовых генераторов, фотодетекторов, модуляторов). Ближний инфракрасный (ИК) диапазон длин волн ($\lambda < 3$ мкм) хорошо освоен. Генерация, модуляция и детектирование излучения среднего ИК диапазона ($\lambda \approx 3-20$ мкм) также вызывают интерес, так как могут найти широкое применение в медицине, экологии, ИК спектроскопии, связи и т.п.

Длины волн $\lambda > 3$ мкм соответствуют энергиям внутризонных переходов носителей заряда в наноструктурах. Несколько вариантов лазеров на внутризонных переходах электронов в квантовых ямах (КЯ) уже создано (см., например, [1, 2]). Однако существующие проблемы, связанные с дорогостоящей технологией их изготовления или сложностью практического использования, ограничивают их применение. Поэтому поиск новых способов получения внутризонной инверсии населенности остается по-прежнему актуальной задачей. Один из таких способов исследуется в настоящей работе. При этом изучается влияние на внутризонную инверсию населенности электрон-фононного, электрон-электронного и электрон-дырочного рассеяния, которые могут разрушать инверсию [1, 3, 4].

В настоящей работе исследуется также внутризонное поглощение света в КЯ при приложении электрического поля вдоль квантово-размерных слоев. В таких условиях температура электронов может сильно отличаться от температуры решетки. Оптические явления, возникающие благодаря разогреву носителей заряда, интересны с физической точки зрения и могут быть использованы для создания новых приборов оптоэлектроники. Благодаря малой инерционности явлений разогрева, определяемой обычно временем релаксации энергии ($10^{-10} - 10^{-12}$ с), возможно создание скоростных электрооптических модуляторов. Так, для излучения дальнего ИК диапазона с $\lambda \approx 70-210$ мкм

известен малоинерционный модулятор, основанный на межподзонных переходах горячих дырок в германии [5]. В настоящей работе рассмотрены два механизма модуляции излучения среднего ИК диапазона, основанные на межподзонных переходах горячих электронов в КЯ. Оптические явления, возникающие в КЯ в продольном электрическом поле, изучены слабо. Обычно внутризонные поглощение и эмиссия света исследуются при приложении поперечного электрического поля или при оптическом возбуждении [1, 2, 6], при этом разогрев носителей заряда является побочным процессом.

Разогрев носителей заряда происходит в процессе работы многих оптоэлектронных приборов (квантовых каскадных лазеров, инжекционных лазеров и др.) в области больших токов и влияет на приборные характеристики. Поэтому при проектировании и оптимизации приборов определение температуры электронов является актуальной задачей. В настоящей работе электронная температура определена в прямоугольных и туннельно-связанных КЯ при приложении продольного электрического поля. При этом учтена возможность накопления неравновесных оптических фононов в сильных полях и определено их влияние на внутризонные оптические явления. Отметим, что оптические явления с учетом неравновесных фононов исследовались ранее в объемных полупроводниках [7, 8], однако в КЯ изучалось влияние неравновесных фононов только на межзонную фотолуминесценцию и динамические свойства электронов при оптическом возбуждении [7].

Цель работы – исследование влияния разогрева электронов сильным электрическим полем на внутризонные оптические явления в КЯ, анализ возможности получения внутризонной инверсии населенности и изучение ее характеристик, анализ модуляции излучения среднего ИК диапазона в квантовых ямах специальной конструкции.

Основные задачи работы можно разделить на три группы:

1. Определение температуры электронов в КЯ в сильных электрических полях с учетом неравновесных оптических фононов. Оценка величины

изменения интенсивности внутривозонной эмиссии и коэффициента межвозонного поглощения света в КЯ вследствие влияния неравновесных оптических фононов.

2. Анализ и объяснение экспериментальных данных по модуляции межвозонного поглощения света в селективно легированных резонансных и туннельно-связанных квантовых ямах в электрическом поле:

- расчет энергетического спектра и волновых функций электронов путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона;
- вычисление вероятностей рассеяния горячих электронов при внутривозонных переходах с учетом специфики рассматриваемых КЯ;
- анализ физических механизмов модуляции, расчет коэффициента поглощения света и его сравнение с экспериментальными данными.

3. Оценка возможности получения внутривозонной инверсии населенности в ступенчатых квантовых ямах:

- расчет энергетического спектра и волновых функций электронов в модели Кейна;
- вычисление времен жизни электронов на уровнях размерного квантования и скоростей захвата электронов из континуума на уровни КЯ при рассеянии на полярных оптических фононах;
- определение величины внутривозонной инверсии населенности путем решения системы скоростных уравнений;
- расчет изменения величины внутривозонной инверсии населенности вследствие межвозонного электрон-электронного ($e-e$) и электрон-дырочного ($e-h$) рассеяния;
- оптимизация параметров КЯ для получения наибольшего коэффициента усиления для излучения среднего ИК диапазона.

Научная новизна работы. Для полупроводниковых КЯ специальной формы предложены физические механизмы и расчеты, описывающие внутривозонные оптические эффекты и рассеяние электронов, а именно:

- модуляцию внутризонного поглощения в сильном продольном электрическом поле в селективно легированных резонансных КЯ;
- влияние неравновесных оптических фононов на внутризонную эмиссию и межподзонное поглощение света в КЯ в сильных электрических полях;
- температурную зависимость спектра межподзонного поглощения в селективно легированных двойных туннельно-связанных КЯ, связанную с перераспределением электронов между подзонами, изменением объемного заряда и, как следствие, изменением волновых функций, оптических матричных элементов и энергий переходов;
- скорость рассеяния энергии горячих электронов в многослойных КЯ с учетом вида огибающих волновых функций электронов в подзонах;
- модуляцию внутризонного поглощения в селективно легированных двойных туннельно-связанных КЯ в электрическом поле с учетом продольной и поперечной компонент поля, вызывающих перераспределение электронов между двумя нижними подзонами, разогрев электронов, изменение их энергетического спектра, волновых функций и оптических матричных элементов переходов;
- внутризонную инверсию населенности в ступенчатых КЯ в условиях токовой инжекции и межзонного стимулированного излучения;
- скорости межподзонного $e-e$ и $e-h$ рассеяния, влияющие на внутризонную инверсию населенности электронов в асимметричных ступенчатых КЯ.

Рассчитаны глубина модуляции внутризонного поглощения света и величина внутризонной инверсии населенности в исследуемых структурах.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. В результате проведенных расчетов и анализа экспериментальных данных сделан вывод о возможности получения внутризонной инверсии населенности, достаточной для генерации излучения среднего ИК диапазона в асимметричных ступенчатых КЯ, а также эффективной модуляции излучения среднего ИК диапазона в туннельно-связанных КЯ.

2. Найдена оптимальная энергия кванта излучения среднего ИК диапазона, для которой может быть получена наибольшая глубина модуляции в структуре с туннельно-связанными КЯ.

3. Выбраны параметры асимметричной ступенчатой КЯ для получения наибольшего коэффициента усиления излучения среднего ИК диапазона.

4. Показано, что $e-e$ и $e-h$ рассеяние в асимметричных ступенчатых КЯ не разрушает внутризонную инверсию населенности для излучения среднего ИК диапазона. Наибольшая величина внутризонной инверсии населенности может быть достигнута в лазерных структурах с малой пороговой для межзонного стимулированного излучения концентрацией носителей заряда в КЯ (менее $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). В этом случае уменьшение внутризонной инверсии вследствие $e-e$ и $e-h$ рассеяния не должно превышать 10%.

5. В последующих исследованиях в области полупроводниковых КЯ могут быть использованы предложенные в настоящей работе схемы расчетов времен внутризонного рассеяния электронов на полярных оптических фононах, в том числе с учетом неравновесных фононов, на акустических фононах, ионизованных атомах примеси, $e-e$ и $e-h$ рассеяния в КЯ сложной формы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Неравновесные полярные оптические фононы существенно влияют на величину оптических эффектов, связанных с внутризонными переходами электронов при их разогреве продольным электрическим полем в квантовых ямах.

2. Учет возможности «антипересечения» уровней в электрическом поле в туннельно-связанных квантовых ямах с малым энергетическим расстоянием между двумя нижними подзонами позволяет удовлетворительно интерпретировать экспериментальные данные по модуляции межподзонного поглощения света, которая может быть объяснена перераспределением электронов между нижними подзонами и изменением их энергетического спектра и волновых функций.

3. В асимметричных ступенчатых квантовых ямах в условиях токовой инжекции и межзонного стимулированного излучения возможно появление внутризонной инверсии населенности, достаточной для генерации излучения среднего ИК диапазона.

4. Межподзонное электрон-электронное и электрон-дырочное рассеяние в асимметричных ступенчатых квантовых ямах типа InGaAs/AlGaAs не разрушает внутризонную инверсию населенности для среднего ИК излучения. В лазерных структурах с пороговой для межзонного стимулированного излучения концентрацией носителей заряда менее $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ уменьшение внутризонной инверсии населенности вследствие электрон-электронного и электрон-дырочного взаимодействия составляет примерно 10%.

Достоверность и надежность результатов основана на их соответствии результатам экспериментов и согласии с результатами других работ, посвященных сходной тематике.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих отечественных и международных конференциях: Городская студенческая научная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой наноэлектронике (Санкт-Петербург, 1998); 6, 7 International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" (St. Petersburg, 1998, 1999); 11th International Conference on Superlattices, Microstructures and Microdevices (Hurgada, 1998); 10th, 11th Vilnius Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors (Vilnius, 1998, 2001); 24th International Conference on the Physics of Semiconductors (Jerusalem, 1998); The 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (Osaka, 2000); Российско-Украинский Семинар "Нанофизика и Наноэлектроника" (Киев, 2000); European Conference on Laser and Electro-Optics (Nice, 2000); 4 и 5 Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 1999; Н.Новгород, 2001); 7 Всероссийская молодежная научная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2005).

Публикации. По теме диссертации имеется 33 публикации, из них 11 статей в отечественных и международных журналах. Основное содержание отражено в восьми работах, перечень которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 112 наименований; содержит 153 страницы машинописного текста, включая 45 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов, даны сведения о структуре и содержании работы и приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по излучательным и безызлучательным внутризонным переходам электронов в КЯ. Выбраны объекты исследования и определены задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию влияния неравновесных полярных оптических фононов на внутризонную эмиссию и межподзонное поглощение света в прямоугольных селективно легированных резонансных КЯ при приложении продольного электрического поля [A1, A2].

В параграфе 2.1 изучено влияние неравновесных фононов на скорость рассеяния энергии горячих электронов в КЯ [A1]. Рассмотрены два способа расчета скорости рассеяния энергии. Первый способ основан на вычислении разности вероятностей испускания и поглощения электронами равновесных полярных оптических фононов при внутризонном рассеянии. Вторым способом, основанным на вычислении скорости изменения числа фононов, позволяет ввести время жизни фононов $\tau_q \neq 0$, найти неравновесную функцию их распределения по волновым векторам и выявить вклад неравновесных оптических фононов в скорость рассеяния энергии. Результаты расчета первым способом и вторым при $\tau_q = 0$ совпадают. Получено хорошее согласие

результатов проведенных расчетов при $\tau_q \neq 0$ с экспериментальными данными разных авторов [7, 9].

В параграфе 2.2 результаты расчета скорости рассеяния энергии использованы при решении уравнения баланса мощности для основной подзоны прямоугольной КЯ в условиях разогрева электронов продольным электрическим полем. Найдена основная характеристика горячих электронов – электронная температура – для случаев $\tau_q = 0$ и $\tau_q = 7$ пс [A1]. Это позволило определить влияние неравновесных фононов на величину внутривозонной эмиссии света из прямоугольных КЯ GaAs/Al_{0,22}Ga_{0,78}As [A2]. Результаты расчета электронной температуры с учетом неравновесных фононов совпадают с данными, полученными из анализа экспериментальных спектров внутривозонной эмиссии. Показано, что появление неравновесных фононов увеличивает электронную температуру, вследствие чего спектральная плотность излучения в рассмотренном диапазоне длин волн и электрических полей возрастает в 1.5 – 2.5 раза.

В параграфе 2.3 исследовано влияние неравновесных фононов на модуляцию межподзонного поглощения в селективно легированных резонансных КЯ GaAs/AlGaAs (рис. 1 а) в продольных электрических полях E . Предполагалось, что экспериментально обнаруженный в работе [10] рост поглощения $\Delta\alpha$ излучения CO₂-лазера под действием поля может происходить вследствие увеличения энергии межподзонного перехода E_{12} по отношению к энергии кванта излучения $h\nu$ (рис. 1 б). Энергия E_{12} увеличивается вследствие заброса электронов на уровень 2 при их разогреве электрическим полем, перераспределения этих электронов в область барьера в соответствии с

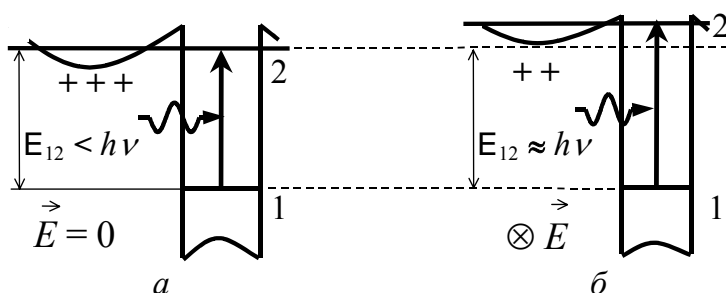


Рис. 1. Механизм модуляции света сильным продольным электрическим полем в селективно легированных резонансных КЯ.

волновой функцией и компенсации зарядов примеси, в результате чего уменьшается объемный заряд и повышается энергия уровня 2.

Для оценки влияния на этот эффект неравновесных фононов, электрическому полю была сопоставлена электронная температура с учетом и без учета неравновесных фононов. Использование найденных электронных температур в функции распределения электронов и самосогласованное решение уравнений Пуассона и Шредингера позволило определить изменение энергии межподзонного перехода в электрическом поле и, следовательно, $\Delta\alpha$. Показано, что появление неравновесных фононов с $\tau_q = 7$ пс более чем на порядок увеличивает $\Delta\alpha$ и улучшает согласие расчета и эксперимента [A1].

Основные выводы второй главы сформулированы в параграфе 2.4.

Третья глава посвящена исследованию модуляции межподзонного поглощения света в туннельно-связанных КЯ (ТСКЯ) GaAs/AlGaAs при приложении продольного электрического поля (рис. 2) [A3].

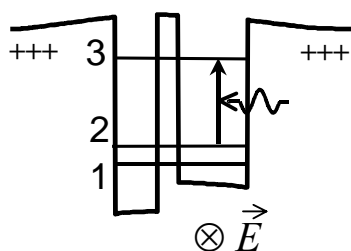


Рис. 2. Поглощение света в селективно легированных туннельно-связанных КЯ.

В параграфе 3.1 рассчитана спектральная зависимость межподзонного поглощения в отсутствие поля при различных температурах решетки [A4]. Из сравнения с экспериментально найденными спектрами и анализа их изменения при оптическом возбуждении определены положения близко лежащих уровней размерного квантования.

Скорректированы параметры КЯ. Для новых параметров КЯ найден энергетический спектр и волновые функции электронов с учетом влияния пространственного заряда. Непараболичность энергетического спектра учтена в модели Экенберга [11]. Дано объяснение температурной зависимости спектра поглощения, основанное на перераспределении электронов между подзонами, изменении их энергетического спектра и волновых функций.

В параграфах 3.2 и 3.3 рассчитаны вероятности межподзонного рассеяния электронов в ТСКЯ (на полярных оптических и деформационных акустических фононах и ионизованных атомах примеси), что необходимо для анализа модуляции поглощения света в электрическом поле [A5]. Предложенные схемы расчета позволяют учитывать реальный вид волновых функций электронов в многослойных КЯ и разную степень разогрева электронов в разных подзонах.

В параграфе 3.4 предложена интерпретация экспериментально полученных в [12] данных по модуляции межподзонного поглощения в продольном электрическом поле [A5]. Падающее излучение CO₂-лазера может поглощаться при переходах 2→3 (рис. 2). В отсутствие поля концентрация электронов на уровне 2 невелика, и поглощение на переходах 2→3 мало. При включении поля возрастает средняя энергия электронов и вероятность их рассеяния в подзону 2, что приводит к значительному увеличению поглощения.

Концентрации и температуры электронов в подзонах 1 и 2 в электрических полях определены из системы уравнений баланса мощности для каждой подзоны, равенства потоков частиц между подзонами и сохранения числа частиц. Переходы электронов и перенос энергии между подзонами рассмотрены с учетом рассеяния электронов на ионизованных атомах примеси, оптических и акустических фононах. Скорость внутриводзонной релаксации энергии электронов найдена с учетом неравновесных оптических фононов.

Обнаружено, что экспериментально найденная зависимость изменения коэффициента межподзонного поглощения $\Delta\alpha$ от поля в данной структуре не может быть объяснена только эффектами разогрева электронов. Предложено объяснение наблюдаемой модуляции, основанное на предположении о возникновении в данной структуре поперечной компоненты электрического поля. В этом случае происходит «антипересечение» близких по энергиям двух нижних уровней, которое приводит к существенной перестройке спектра поглощения света. Вследствие этого рост поглощения излучения CO₂-лазера ограничивается при увеличении напряженности внешнего поля выше 150 В/см.

Изменение коэффициента поглощения вычислено с учетом изменения силы осциллятора, энергии оптического перехода, концентрации и температуры электронов в электрическом поле. Показано, что учет неравновесных фононов позволяет лучше описать ход экспериментальной зависимости модуляции от поля. Найдена оптимальная энергия кванта излучения (136 мэВ), для которой может быть получена наибольшая глубина модуляции в данной структуре [A5].

Основные выводы третьей главы сформулированы в параграфе 3.5.

В четвертой главе рассмотрены механизмы межподзонного рассеяния электронов, определяющие степень внутризонной инверсии населенности электронов в ступенчатых КЯ InGaAs/AlGaAs (рис. 3).

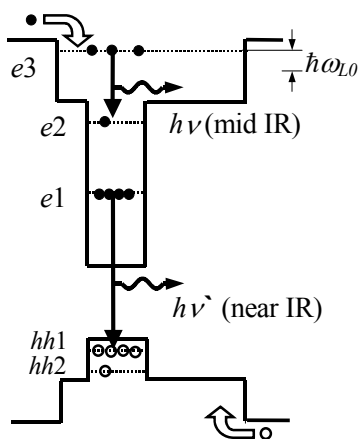


Рис. 3. Оптические переходы в асимметричных ступенчатых КЯ.

электронов в ступенчатых КЯ InGaAs/AlGaAs (рис. 3).

В параграфе 4.1 рассмотрен способ создания внутризонной инверсии населенности при инжекции носителей заряда [A6], рассчитан энергетический спектр и волновые функции электронов в модели Кейна [A7]. Метастабильный уровень (e_3) формируется благодаря слабому перекрытию его волновой функции с волновыми функциями уровней e_2 и e_1 . Благодаря генерации в структуре межзонного стимулированного излучения $h\nu'$ концентрации электронов и дырок на основных уровнях стабилизируются, что предотвращает разрушение внутризонной инверсии населенности из-за $e-e$ и $e-h$ рассеяния при увеличении инжекционного тока.

стабилизируются, что предотвращает разрушение внутризонной инверсии населенности из-за $e-e$ и $e-h$ рассеяния при увеличении инжекционного тока.

В параграфе 4.2 вычислены времена межподзонного электрон-фононного рассеяния. Получено, что вероятность (обратное время) перехода электрона $e_2 \rightarrow e_1$ более чем на порядок превосходит вероятность перехода электрона $e_3 \rightarrow e_2$. Кроме того, вероятности захвата электронов из континуума в яму на уровни e_2 и e_1 пренебрежимо малы по сравнению с захватом на уровень e_3 . Таким образом, показано, что при инжекции электронно-дырочных пар степень инверсии населенности между уровнями e_3 и e_2 может быть достаточно высока [A6].

В параграфах 4.3 и 4.4 установлены типы наиболее вероятных межподзонных $e-e$ и $e-h$ процессов, влияющих на внутризонную инверсию населенности в ступенчатых КЯ [А7, А8]. Предложены схемы расчета и проведены вычисления времен рассеяния при разных температурах.

В параграфе 4.5 исследована зависимость времен межподзонного $e-e$ и $e-h$ рассеяния от концентрации электронов и дырок на основных уровнях КЯ [А8]. Показано, что при концентрациях, меньших $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, времена $e-e$ и $e-h$ процессов превышают времена рассеяния на фононах при аналогичных межподзонных переходах электронов. Поэтому основным механизмом рассеяния, определяющим степень инверсии населенности уровней e_3 и e_2 , является испускание полярных оптических фононов. При превышении данной концентрации времена жизни на уровнях e_3 и e_2 (и, следовательно, инверсия населенности) определяются межподзонным $e-e$ и $e-h$ рассеянием.

Выводы к четвертой главе приведены в параграфе 4.6.

В пятой главе рассмотрена межподзонная инверсия населенности электронов в ступенчатых КЯ, при этом использованы предложенные ранее схемы расчетов времен межподзонной релаксации электронов.

В параграфе 5.1 выбраны параметры КЯ, оптимальные для получения наибольшего коэффициента усиления среднего ИК излучения [А6].

В параграфе 5.2 для заданных параметров КЯ, волновода и резонатора определены пороговые коэффициент усиления, величина внутризонной инверсии населенности и плотность инжекционного тока в лазерной структуре, необходимые для генерации излучения среднего ИК диапазона. Система скоростных уравнений при токовой инжекции электронно-дырочных пар решена с учетом основных межподзонных процессов электрон-фононного, $e-e$ и $e-h$ рассеяния, спонтанного и стимулированного межзонного излучения, а также захвата электронов на уровни КЯ. Проанализированы величина плотности порогового тока ($\sim 10 \text{ кА/см}^2$), возможность ее достижения в лазерной структуре с КЯ и ее зависимости от температуры и концентрации.

В параграфе 5.3 при плотности инжекционного тока вблизи порогового значения проанализированы зависимости величины внутризонной инверсии населенности от температуры и концентрации неравновесных носителей заряда [A8]. Показано, что процессы $e-e$ и $e-h$ взаимодействия, уменьшая инверсию, не приводят к ее разрушению. Наибольшей величины внутризонной инверсии населенности можно достичь в структурах с наименьшей пороговой концентрацией электронов и дырок для межзонного излучения. При концентрации $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $e-e$ и $e-h$ рассеяние уменьшают инверсию не более чем на 10%. Увеличение температуры с 80 К до 300 К приводит к уменьшению инверсии при данной концентрации примерно на 30%.

Основные результаты пятой главы приведены в параграфе 5.4.

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложены схемы расчетов вероятностей межподзонного рассеяния электронов на полярных оптических и акустических фононах, ионизованных атомах примеси, $e-e$ и $e-h$ рассеяния с учетом вида огибающих волновых функций электронов в подзонах в КЯ типа GaAs/AlGaAs специальной формы.

2. Вычислены скорости рассеяния энергии горячих электронов в КЯ GaAs/AlGaAs с учетом накопления полярных оптических фононов для разных значений параметров КЯ, концентраций электронов, времен жизни фононов.

3. Показано, что расчет температуры горячих электронов в КЯ удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными разных опытов только при учете накопления полярных оптических фононов.

4. Показано, что накопление неравновесных оптических фононов существенно влияет на величину внутризонного поглощения и эмиссии света в селективно легированных КЯ GaAs/AlGaAs в греющем электрическом поле.

5. В туннельно-связанных КЯ GaAs/AlGaAs путем количественного сравнения расчетных и полученных экспериментально спектров внутризонного

поглощения при разных температурах определены положения близко лежащих уровней, не разрешаемых экспериментальными методами.

6. Показано, что найденное энергетическое расстояние между двумя нижними уровнями в туннельно-связанных КЯ близко к своему минимально возможному значению, связанному с «антипересечением» этих уровней.

7. Показано, что температурная зависимость спектра внутризонного поглощения в туннельно-связанных КЯ GaAs/AlGaAs связана с перераспределением электронов между двумя нижними уровнями, изменением объемного заряда, энергий и оптических матричных элементов переходов.

8. Объяснены экспериментальные данные по модуляции внутризонного поглощения в туннельно-связанных КЯ GaAs/AlGaAs в продольном электрическом поле с учетом «антипересечения» двух нижних уровней при возникновении в образце поперечной компоненты поля. Показано, что модуляция происходит вследствие перераспределения электронов между подзонами и изменения их энергетического спектра и волновых функций.

9. Найдена энергия кванта среднего ИК излучения, для которой может быть получена наибольшая глубина модуляции в структуре с туннельно-связанными КЯ GaAs/AlGaAs.

10. Теоретически показано, что в асимметричных ступенчатых КЯ типа InGaAs/AlGaAs в условиях токовой инжекции и межзонного стимулированного излучения возможно появление внутризонной инверсии населенности, достаточной для генерации излучения среднего ИК диапазона.

11. Показано, что межподзонное $e-e$ и $e-h$ взаимодействие в асимметричных ступенчатых КЯ не разрушает внутризонную инверсию населенности для излучения среднего ИК диапазона. При концентрации электронов и дырок на основных уровнях КЯ менее $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ уменьшение инверсии вследствие $e-e$ и $e-h$ рассеяния не превышает 10% при температуре 80 К и 5% при 300 К.

12. В асимметричной ступенчатой КЯ $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ найдены оптимальные ширины слоев (3.8, 6.8 и 11.4 нм соответственно) для

получения наибольшего коэффициента усиления среднего ИК излучения. Плотность порогового тока в структуре с выбранными параметрами может составить примерно 9 кА/см^2 при 80 К и 12 кА/см^2 при 300 К.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

- A1. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зерова В.Л., Фирсов Д.А. Разогрев электронов сильным продольным электрическим полем в квантовых ямах // ФТП. – 2003. – Т. 37, Вып. 5. – С. 604-611.
- A2. Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зерова В.Л., Кочегаров Ю.В., Фирсов Д.А., Донецкий Д.В. Испускание и поглощение дальнего инфракрасного излучения горячими электронами в квантовых ямах // 4-я Всерос. Конф. по физике полупроводников: Тез. докл., – Новосибирск, 1999. – С. 184.
- A3. Vorobjev L.E., Zerova V.L., Titkov I.E., Firsov D.A., Shalygin V.A., Tulupenko V.N., Towe E. Birefringence and absorption of infrared radiation in tunnel-coupled GaAs/AlGaAs quantum wells in a longitudinal electric field // Superlattices and Microstructures. – 1999. – Vol. 25, N 1/2. – P. 367-371.
- A4. Зерова В.Л., Капаев В.В., Воробьев Л.Е., Фирсов Д.А., Schmidt S., Зибик Е.А., Seilmeier A., Towe E. Межподзонное поглощение света в селективно легированных асимметричных двойных туннельно-связанных квантовых ямах // ФТП. – 2004. – Т. 38, Вып. 12. – С. 1455-1462.
- A5. Зерова В.Л., Воробьев Л.Е., Фирсов Д.А., Towe E. Модуляция межподзонного поглощения света в электрическом поле в туннельно-связанных квантовых ямах // ФТП. – 2006. – направлена в печать.
- A6. Kastalsky A., Vorobjev L.E., Firsov D.A., Zerova V.L., Towe E. A dual-color injection laser based on intra- and inter-band carrier transitions in semiconductor quantum wells or quantum dots // IEEE J. Quantum Electronics. – 2001. – Vol. 37, N 10. – P. 1356-1362.
- A7. Зерова В.Л., Воробьев Л.Е., Зегря Г.Г. Электрон-электронное рассеяние в ступенчатых квантовых ямах // ФТП. – 2004. – Т. 38, Вып. 6. – С. 716-722.

А8. Зерова В.Л., Зегря Г.Г., Воробьев Л.Е. Влияние электрон-электронных и электрон-дырочных столкновений на внутризонную инверсную населенность электронов в ступенчатых квантовых ямах // ФТП. – 2004. – Т. 38, Вып. 9. – С. 1090-1096.

Цитированная литература

- [1] Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. // *Science*. – 1994. – Vol. 264. – P. 553-556.
- [2] Gauthier-Lafaye O., Sauvage S., Boucaud P., Julien F.H., Glotin F., Prazeres R., Ortega J.-M., Thierry-Mieg V., Planel R. // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 83, N 6. – P. 2920-2925.
- [3] Kastalsky A. // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1993. – Vol. 29. – P. 1112-1115.
- [4] Kinsler P., Harrison P., Kelsall R.W. // *Phys. Rev. B.* – 1998. – Vol. 58, N 8. – P. 4771-4778.
- [5] Воробьев Л.Е., Стафеев В.И., Фирсов Д.А. // ФТП.– 1983.– Т.17.– С.796-602.
- [6] Dupont E., Delacourt D. // *Appl. Phys. Lett.*– 1993.– Vol.62, N 16.– P.1907-1910.
- [7] Shah J. In: *Spectroscopy of nonequilibrium electrons and phonons*, ed. by Shank C.V. and Zakharchenya B.P. // *Series Modern problems in condensed matter sciences*, ed. by Agranovich V.M., Maradudin A.A. (Netherlands, Elsevier Science, 1992). – Vol. 35. – P.57.
- [8] Воробьев Л.Е., Осокин Ф.И. // ФТП. – 1979. – Т.13. – С. 1494-1501.
- [9] Gupta R., Balcan N., Ridley B.K. // *Semicond. Sci. Technol.* – 1992. – Vol. 7. – P. B274-B278.
- [10] Воробьев Л.Е., Данилов С.Н., Зибик Е.А., Кочегаров Ю.В., Фирсов Д.А., Тове Е., Сан В., Торопов А.А., Шубина Т.В. // ФТП.- 1995.- Т.29.- С.1136-1148.
- [11] Ekenberg U. // *Phys. Rev. B.* – 1987. – Vol. 36, N 11. – P. 6152-6155.
- [12] Воробьев Л.Е., Титков И.Е., Торопов А.А., Тулупенко В.Н., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А., Шубина Т.В., Towe E. // ФТП. – 1998. – Т.32. – С. 852-856.