

На правах рукописи

Гавриленко Людмила Владимировна

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗОНАНСНЫХ
СОСТОЯНИЙ МЕЛКИХ ДОНОРОВ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ
ЯМАМИ И ОБЪЕМНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент

В. Я. Алешкин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

И. Н. Яссиевич

доктор физико-математических наук, доцент

А. М. Сатанин

Ведущая организация: ФИАН им. П.Н.Лебедева, Москва

Защита состоится 7 декабря 2006 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 в Институте физики микроструктур РАН (603950, Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан 30 октября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Полупроводниковые наноструктуры уже широко используются в оптоэлектронике как в видимом, так и в ближнем и среднем инфракрасных (ИК) диапазонах. Однако до настоящего времени дальний ИК-диапазон освоен мало, хотя приборы, излучающие в этом диапазоне частот, могут получить очень широкое применение в радиоастрономии, спектроскопии, мониторинге окружающей среды, в медицинской диагностике, технике связи, для неразрушающего контроля, борьбы с терроризмом.

Получение стимулированного излучения в дальнем ИК-диапазоне возможно при переходах носителей заряда между локализованными и резонансными состояниями мелких примесей в полупроводниках. Например, в одноосно сжатом p -Ge при приложении электрического поля была продемонстрирована лазерная генерация длинноволнового ИК-излучения на таких переходах [1]. Однако в объемных полупроводниках параметры резонансных состояний изменять достаточно сложно. В полупроводниковых гетероструктурах с квантовыми ямами (КЯ) энергия связи примесного состояния зависит от ширины ямы и положения примеси в квантовой яме, это дает возможность управлять частотой излучения. При этом резонансные состояния мелких доноров в КЯ исследованы на данный момент неполно. В нескольких работах (см., например, [2]) вычислялась энергия связи нижнего резонансного состояния $2p_0$, а такой важный параметр для моделирования инверсии населенностей как время жизни электрона в резонансном состоянии вычислялся либо в приближении узкой и бесконечно глубокой КЯ [3,4], либо для КЯ конечной ширины, но без учета процессов рассеяния на акустических и оптических фононах [5,6]. В этой связи, предпринятое в диссертационной работе исследование времени жизни резонансных состояний доноров в квантовых ямах и вероятностей оптических переходов электронов между резонансными и локализованными состояниями является весьма актуальным.

Кроме того, в диссертационной работе построена теория, которая позволяет количественно описать резонансы Фано, наблюдаемые в спектре примесного фототока в n -GaAs. В данном случае резонансом Фано называются асимметричные пики в спектрах примесного фототока легированных полупроводников в области энергий, соответствующих энергии оптического фонона в этом материале. Такие асимметричные пики отвечают наличию резонансного состояния, в нашем случае это сложное состояние "электрон+фонон", при этом электрон находится в локализованном примесном

состоянии, но в системе присутствует испущенный оптический фонон, который может быть поглощен электроном при переходе в состояние континуума. Вплоть до настоящего времени для количественного описания таких особенностей в спектре фототока использовалась формула, полученная в работе Фано [7]. В этой работе предполагалось, что начальное состояние электрона и резонансное состояние – это различные состояния и поэтому для описания переходов электрона между ними использовалась теория возмущений первого порядка. Однако в полупроводниках, легированных мелкими донорами, часто реализуется ситуация, когда начальное и конечное электронные состояния совпадают.

Основное внимание в диссертации уделено изучению фундаментальных свойств состояний мелких доноров в КЯ таких, как время жизни резонансных состояний, частоты излучательных и безызлучательных переходов электронов между примесными состояниями, которые определяют оптические свойства и электрические характеристики полупроводников и гетероструктур с КЯ, легированных мелкими донорами.

Основные цели работы состояли в следующем:

- Определение времени жизни резонансных состояний мелких доноров в КЯ и исследование оптических переходов с участием резонансных состояний в КЯ. Определение оптимальной ширины КЯ для создания инверсии населенностей между локализованным и резонансным состоянием мелких доноров.
- Поиск условий возникновения инверсии населенностей между основным состоянием донора и континуумом в КЯ в условиях примесного пробоя.
- Построение количественной теории резонанса Фано в спектрах фотопроводимости в объемных полупроводниках и в КЯ, легированных мелкими донорами.

Научная новизна

1. Показано, что в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами, легированных мелкими донорами, время жизни резонансного состояния, принадлежащего второй подзоне размерного квантования, определяется в основном рассеянием электронов на полярных оптических фононах, если расстояние между подзонами размерного квантования больше энергии оптического фонона.

2. Обнаружена возможность получения инверсии населенностей между основным состоянием донора в КЯ и дном первой подзоны размерного квантования в условиях ударной ионизации мелких доноров в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами, легированных мелкими донорами.
3. Построена количественная теория, описывающая резонанс Фано в спектре фототока GaAs, легированного мелкими донорами.
4. Исследовано изменение формы пика резонанса Фано при переходе от объемного материала к квантовой яме. Предсказано существенное уширение пика резонанса Фано в спектре фотопроводимости при переходе от объемного материала n -GaAs к квантовой яме GaAs, связанное с более жестким электрон-фононным взаимодействием в КЯ. Уширение пика подтверждено экспериментально.

Научная и практическая значимость

1. Предложен механизм формирования инверсии населенностей между основным состоянием донора и дном первой подзоны в квантовой яме GaAs/AlGaAs в условиях примесного пробоя.
2. Разработана количественная теория резонанса Фано в спектрах фотопроводимости прямозонных полупроводников, легированных мелкими донорами, которая позволила описать экспериментальные результаты.
3. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при создании оптоэлектронных приборов на основе легированных гетероструктур с КЯ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В гетероструктурах GaAs/AlGaAs с КЯ, легированных мелкими донорами, время жизни резонансного состояния, принадлежащего второй подзоне размерного квантования, определяется рассеянием на полярных оптических фононах, если такие процессы рассеяния не запрещены законом сохранения энергии.
2. При моделировании электронного транспорта в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с КЯ выявлены условия, необходимые для возникновения инверсии населенностей между основным состоянием донора в КЯ и дном первой подзоны размерного квантования в режиме примесного пробоя.

3. Создана количественная теория, описывающая резонанс Фано в спектре фототока GaAs, легированного мелкими донорами.
4. При переходе от объемного материала к квантовой яме пик резонанса Фано в спектре фотопроводимости существенно уширяется, что связано с более жестким электрон-фононным взаимодействием в КЯ.

Личный вклад автора в получение результатов

- Определяющий в проведение расчетов резонанса Фано в спектрах фототока объемных полупроводников и гетероструктур с квантовыми ямами [A12, A14, A16, A17, A18, A19, A20].
- Равнозначный при проведении расчетов резонансных состояний мелких доноров в гетероструктурах с квантовыми ямами (совместно с научным руководителем) [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A9].
- Основной при проведении расчетов спектров мелких доноров в магнитных полях [A7, A8, A11].
- Равнозначный при проведении расчетов функций распределения в условия примесного пробоя мелких доноров в гетероструктурах с квантовыми ямами (совместно с В.Я.Алешкиным и А.А.Дубиновым) [A10, A13, A15].

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на семинарах ИФМ РАН, российских и международных конференциях, рабочих совещаниях: VI, VII Российских конференциях по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 27 - 31 октября, 2003; 18-23 сентября 2005г., Москва-Звенигород), Совещаниях «Нанофотоника» (Нижний Новгород, 11 - 14 марта, 2003; 2 - 6 мая, 2004), IV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 3 - 6 декабря, 2002), 11-ом, 12-ом, 13-ом Международных симпозиумах «Наноструктуры: физика и технология» (Санкт-Петербург)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, из которых 3 статьи в ведущих журналах и 17 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка цитируемой литературы и списка работ автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 151 страниц. В диссертации содержится 48 рисунков, 1 таблица. Список цитируемой литературы включает 72 наименования.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, научная новизна и практическая значимость. Приводится краткое содержание диссертации, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит четыре параграфа и посвящена обзору литературы. В первом параграфе описываются исследования состояния мелких доноров в объемном GaAs. Обсуждается применимость метода эффективной массы для расчета состояний мелких доноров, а также отклонения реальных примесных спектров поглощения от водородоподобного спектра, вызванные потенциалом центральной ячейки. Описаны основные экспериментальные методы исследования примесных состояний в полупроводниках, их достоинства и недостатки.

Во втором параграфе обсуждаются локализованные и резонансные состояния мелких доноров в КЯ. Основное внимание здесь уделено различным теоретическим методам описания донорных состояний в КЯ, рассматривается влияние таких факторов, как непараболичность закона дисперсии электронов в зоне проводимости, разница диэлектрических проницаемостей и эффективных масс электронов в барьере и КЯ. Обсуждается поведение различных донорных уровней при переходе от объемного материала к КЯ в зависимости от симметрии волновой функции донорного состояния в объеме и возникновение резонансных состояний.

В третьем параграфе первой главы рассматриваются работы, где показана возможность получения стимулированного излучения при приложении электрического поля к полупроводнику, легированному мелкими примесями. Механизм возникновения инверсии населенностей связывается с опус-

тошением примесных состояний за счет ударной ионизации в электрическом поле.

В четвертом параграфе обсуждаются работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям резонансов Фано в спектрах фототока легированных полупроводников. Рассматривается механизм возникновения резонансного состояния (электрон+фонон).

В последующих главах представлены оригинальные результаты. Во **второй главе** исследуются резонансные состояния мелких доноров в КЯ, которые возникают, когда дискретные донорные уровни попадают в непрерывный спектр нижележащих подзон размерного квантования. В первом параграфе этой главы с помощью метода разложения по плоским волнам [8] вычисляются волновые функции и энергетический спектр электронов в КЯ GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As в присутствии потенциала донора. Волновые функции резонансных состояний и состояний непрерывного спектра раскладывались в ряд по собственным функциям гамильтониана для электрона в КЯ (без учета потенциала примеси). В результате такого разложения решение уравнения Шредингера сводится к диагонализации симметричной действительной матрицы. Для зависимостей эффективной массы электрона и положения дна зоны проводимости от доли алюминия использовались данные работы [9].

Во втором параграфе исследована зависимость энергии ионизации донорных состояний и времени жизни резонансного состояния от положения примеси в КЯ и в барьере, а также от ширины КЯ. С увеличением ширины КЯ (при постоянной глубине) энергия ионизации донорных состояний уменьшается из-за более слабой локализации волновой функции в КЯ. Ширина резонансного уровня Γ , связанная со временем жизни электрона соотношением $\tau = \hbar/\Gamma$, при этом увеличивается, т.к. расстояние между подзонами размерного квантования становится меньше. Зависимость ширины Γ резонансного уровня от положения примеси в КЯ и в барьере приведена на рис. 1 (а).

В третьем параграфе второй главы приводятся вычисления частот рассеяния на фононах для электрона, находящегося в резонансном состоянии. Полученная оценка частоты рассеяния на акустических фононах показывает, что этими процессами можно пренебречь из-за их медленности. Кроме того, проведено сравнение уширения резонансного состояния вследствие автоионизации уровня и вследствие испускания оптического фонона (см. рис. 1 (а) и (б)). Видно, что именно рассеяние на оптических фононах определяет время жизни электрона в резонансном состоянии, если такой процесс рассеяния разрешен законом сохранения энергии.

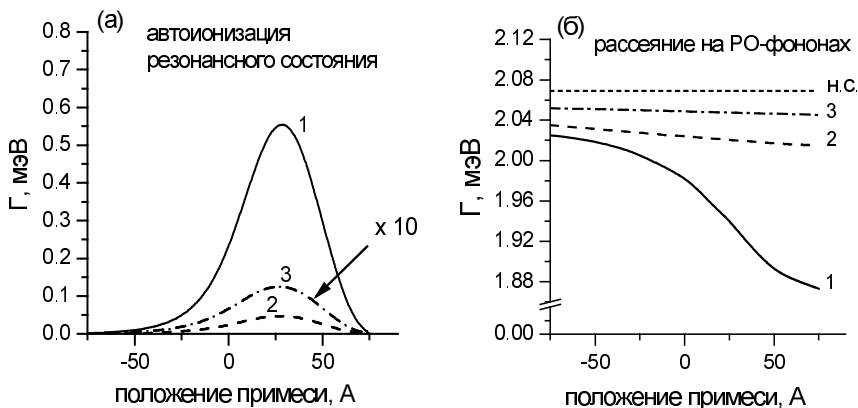


Рис. 1 (а) "Кулоновская" или "автоионизационная" ширина резонансных уровней в зависимости от положения донора в КЯ GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As шириной 150Å. 1, 2, 3-ширина первого, второго и третьего резонансных уровней, принадлежащих 2-ой подзоне, соответственно. Ширина 3-го резонансного уровня умножена на 10.

(б) Зависимость "фононной" ширины резонансных уровней от положения примеси в КЯ GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As шириной 150Å, н.с.- величина Γ для состояний непрерывного спектра на дне 2-ой подзоны.

В четвертом параграфе вычислен коэффициент поглощения электромагнитного излучения для дипольных оптических переходов электронов из основного донорного состояния во вторую подзону, в том числе, в резонансные состояния. Коэффициент поглощения пропорционален плотности конечных состояний электрона. Амплитуда лоренцевого пика пропорциональна плотности состояний в максимуме пика $G_{max} = 2/(\pi\Gamma)$ и обратно пропорциональна ширине уровня Γ , на который совершается переход. Неоднородным уширением донорных состояний, вызванным распределением примеси по координате, можно пренебречь, т.к. по нашим оценкам при разбросе положения примеси до 10 Å в рассматриваемой КЯ GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As шириной 150 Å неоднородное уширение уровня составляет менее 0,1 мЭВ. Эта величина мала по сравнению с однородным уширением, которое определяется уходом электронов из резонансного состояния за счет замешивания подзон кулоновским потенциалом донора (автоионизацией), и рассеянием на оптических фононах. Сравниваются спектры коэффициента поглощения, вычисленные с учетом и без учета процессов рассеяния электронов

на оптических фонах (дельта-легированный слой располагался на расстоянии 50 Å от гетерограницы). Показано, что учет этих процессов почти на порядок уменьшает амплитуду главного пика, который соответствует переходу электрона из основного состояния, принадлежащего первой подзоне, в нижнее резонансное состояние, принадлежащее второй подзоне (см. Рис. 2).

В последнем пятом параграфе второй главы представлен метод расчета донорных состояний в гетероструктурах с квантовыми ямами в магнитном поле, приложенном в направлении роста гетероструктуры. В основе метода лежит разложение волновой функции электрона по собственным функциям гамильтониана, описывающего прямоугольную квантовую яму – по плоским волнам [8]. Выбор базисных функций, не зависящих от магнитного поля, позволяет легко описывать основное и возбужденные примесные состояния не только в сильных магнитных полях, но и в слабых вплоть до нуля.

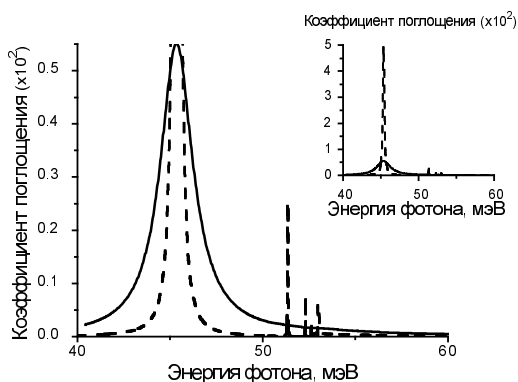


Рис. 2 Спектр безразмерного коэффициента примесного поглощения в КЯ (сплошная линия - с учетом рассеяния на РО-фонах, пунктир - без учета рассеяния). Планарная концентрация доноров считалась равной $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. На вставке показано соотношение амплитуд основных пиков.

Третья глава посвящена исследованию возможности получения инверсии населенностей между основным состоянием донора в КЯ и дном первой подзоны в условиях примесного пробоя. Возможность получения инверсии населенностей – это первый шаг на пути к получению стимулированного излучения, которое уже наблюдалось в *p*-Ge [1] и гетероструктурах Si/SiGe, легированных акцепторами [10-12].

В первом параграфе описывается модель, в рамках которой вычислялась функция распределения электронов по импульсу, и решались уравнения баланса. На первом этапе для одиночной квантовой ямы, в электрическом поле, направленном вдоль слоя квантовой ямы, при температуре жид-

кого гелия с помощью метода Монте-Карло вычислялась функция распределения электронов по импульсам в подзонах размерного квантования. Предполагалось, что темп и внутривозонных, и межвозонных переходов электронов намного больше, чем темп переходов с участием донорных уровней, и что присутствие донорных уровней не влияет на форму функции распределения (это предположение справедливо при не слишком большой концентрации легирующей примеси). Учитывались переходы носителей только между тремя нижними подзонами, так как в электрических полях до 1000 В/см более высокие подзоны не заполнены. Принимались во внимание рассеяние на деформационных акустических и пьезо-акустических (DA и PA) фононах и полярных оптических (PO) фононах. Кроме того, было учтено рассеяние на заряженных примесях.

На втором этапе, когда с точностью до нормировочного множителя известны функции распределения электронов в подзонах размерного квантования, решались уравнения баланса частиц для нахождения абсолютных значений функций распределения и населенности донорных состояний. При этом рассматривалась двухуровневая система: основной уровень донора ($1s$) в качестве нижнего и вся первая подзона размерного квантования в качестве верхнего уровня. Основное состояние донора очищается за счет ударной ионизации. Электрон из первой подзоны может перейти на уровень донора с испусканием PO-, DA- и PA-фононов, а также в результате Оже-захвата. Частоты рассеяния на акустических фононах пренебрежимо малы в сравнении с частотой испускания PO-фонона и Оже-захвата, поэтому процессы рассеяния на акустических фононах не учитывались.

Во втором, третьем и четвертом параграфах третьей главы вычислялись частоты процессов ударной ионизации основного донорного состояния, Оже-захвата и переходов в основное состояние донора с испусканием оптических фононов.

В пятом параграфе третьей главы приведены условия возникновения инверсии населенности между основным состоянием донора в КЯ и дном первой подзоны размерного квантования (см. рис. 3). Необходимым условием для существования инверсии населенности между дном первой подзоны и $1s$ уровнем является существенно неравновесная функция распределения. Такая функция формируется в присутствии электрического поля в результате процессов рассеяния на оптических фононах, возвращающих электроны, достигшие определенной энергии, на дно первой подзоны. На рис. 3 (а) представлены рассчитанная функция распределения электронов по энергиям в сравнении с максвелловской функцией распределения для одинаковых средних энергий электрона. Понятно, что в малых электрических полях функция распределения почти равновесная и инверсии населенностей нет.

При увеличении электрического поля сначала происходит примесный пробои, а затем возникает инверсия. В сильных электрических полях функция распределения будет сглаживаться и расширяться, т.к. увеличится область энергий на дне подзоны, куда возвращаются электроны после испускания РО-фонона. Так как частота переходов электронов из первой подзоны в 1s состояние с испусканием оптических фононов достаточно велика и не зависит от концентрации доноров, частота ударной ионизации пропорциональна концентрации примеси, а частота Оже-захвата – квадрату концентрации, существует некоторый интервал концентраций, где возникает инверсия населенности (см. Рис. 3 (б)). Следует отметить, что при концентрациях $N_D > 10^{11} \text{ см}^{-2}$ не справедливо предположение о том, что наличие донорных состояний не влияет на форму функции распределения электронов в первой подзоне. Поэтому в использованной модели область инверсии не ограничена по концентрации примеси сверху.

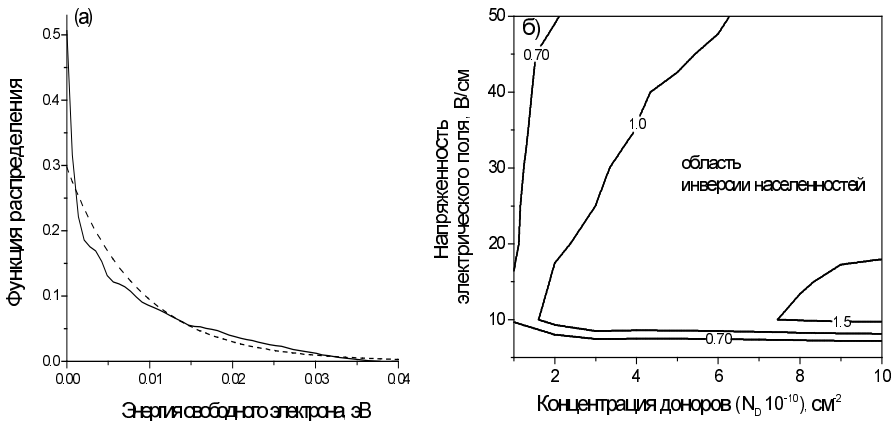


Рис. 3 (а) Сравнение неравновесной функции распределения (сплошная линия) и равновесной (максвелловской) функции распределения (пунктир), построенных для одинаковых средних энергий свободных электронов (8,7 мэВ), при $N_D = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и напряженности электрического поля 10 В/см.
(б) Изолинии отношения вероятности заполнения состояний на дне первой подзоны к вероятности заполнения 1s состояния донора в зависимости от электрического поля и концентрации доноров.

В четвертой главе развита теория, описывающая резонансы Фано в спектре фототока в полупроводниках и в гетероструктурах с КЯ, легированных мелкими донорами. В первом параграфе рассматривается примесное

поглощение света с частотой близкой к частоте РО-фонона, сопровождаемое либо однократным переходом электрона из основного примесного состояния в континуум, либо более сложным переходом: из примесного состояния в континуум с последующим испусканием оптического фонона и возвращением электрона в примесное состояние (в основное или возбужденное). В результате второго перехода возникает резонансное состояние "электрон+фонон", когда электрон локализован около атома примеси, но в системе имеется еще оптический фонон. Сложение амплитуд ("интерференция") этих двух переходов может приводить к асимметричным пикам в спектре поглощения. Волновая функция электрона с учетом присутствия такого резонансного состояния строится так же, как описано в работе Фано [7]. С помощью теории возмущений первого и второго порядка была вычислена вероятность поглощения фотона с энергией близкой к энергии РО-фонона. Затем с учетом коэффициента отражения и коэффициента поглощения в полярном материале GaAs, которые быстро изменяются в области резонанса Фано из-за поглощения света поперечными оптическими фононами, был вычислен спектр примесного фототока.

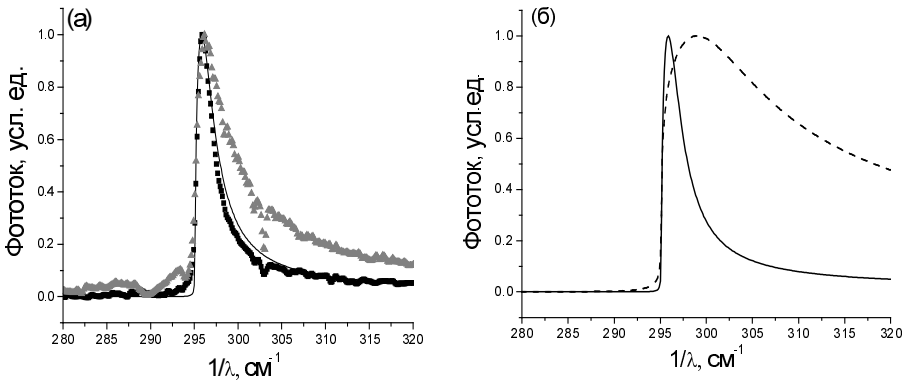


Рис. 4 (а) Точки соответствуют спектрам фотопроводимости, измеренным при $T = 4,2$ К в объемном n -GaAs (черные квадраты) и в гетероструктуре GaAsInP/GaAs с КЯ шириной 90Å (серые треугольники). Линия соответствует спектру, рассчитанному для эпитаксиального слоя объемного n -GaAs толщиной $d = 70$ мкм. Все спектры нормированы на единицу.

(б) Спектр фототока, рассчитанный для объемного материала n -GaAs (сплошная кривая) и для узкой КЯ GaAs шириной 10Å (пунктир) (спектры нормированы на единицу).

Во втором параграфе четвертой главы сравниваются вычисленный и измеренный спектры примесного фототока в области энергии РО фона в n -GaAs (см. рис. 4 (а)). Для вычислений использовались волновые функции локализованных и делокализованных состояний атома водорода.

На рис. 4 (б) сравниваются вычисленные спектры фототока в узкой КЯ и в объемном n -GaAs. Несмотря на то, что теория, развитая в этом параграфе, лишь качественно описывает резонанс Фано в реальной КЯ конечной ширины, получен интересный результат, состоящий в том, что в КЯ пик резонанса становится в несколько раз шире и меньше по амплитуде. Причина значительного увеличения ширины пика заключается в более жестком электрон-фононном взаимодействии в КЯ. Экспериментальные результаты для пика резонанса Фано в КЯ представляют промежуточный случай между объемным материалом и ультра двумерным случаем (см. рис. 4 (а)) и качественно подтверждают теоретические выводы.

В Заключении сформулированы результаты работы.

Основные результаты работы

1. Проведен расчет свойств резонансных состояний мелких доноров в КЯ. Показано, что в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами, легированных мелкими донорами, время жизни резонансного состояния, принадлежащего второй подзоне размерного квантования, определяется в основном рассеянием электронов на полярных оптических фоновых, если такие процессы рассеяния не запрещены законом сохранения энергии. Вычислен коэффициент поглощения света, обусловленный переходами электронов из основного состояния донора в резонансное состояние.
2. Предсказана возможность получения инверсии населенностей между основным состоянием донора в КЯ и дном первой подзоны размерного квантования в условиях ударной ионизации мелких доноров в гетероструктурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами, легированных мелкими донорами.
3. Разработан метод расчета состояний мелких доноров в КЯ в магнитном поле, который позволяет проводить вычисления в широком диапазоне магнитных полей, начиная с нуля. Показано, что метод хорошо описывает имеющиеся экспериментальные результаты.
4. Создана количественная теория, описывающая резонанс Фано в спектре фототока прямозонных полупроводников A_3B_5 , показано, что теория

хорошо описывает резонанс Фано в спектре примесной фотопроводимости в n -GaAs.

5. Предсказано существенное уширение пика резонанса Фано в спектре примесной фотопроводимости при переходе от объемного материала n -GaAs к квантовой яме GaAs, связанное с более жестким электрон-фононным взаимодействием в КЯ. Уширение пика подтверждено экспериментально.

Список цитированной литературы

1. Алтухов, И.В. Резонансные состояния акцепторов и стимулированное терагерцовое излучение одноосно деформированного германия / И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев, М.А. Одноблюдов, В.П. Синис, Е.Г. Чиркова, И.Н. Ясиевич // ЖЭТФ. – 1999. – Т.115. – Вып.1. – С.89-100.
2. Green, R.L. Binding energy of the $2p_0$ -like level of a hydrogenic donor in GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs quantum-well structures/ R.L. Green, K.K. Bajaj // Physical Review B. – 1985. – Vol. 31. – No.6. – P. 4006-4008.
3. Priester, C. Resonant impurity states in quantum-well structures/ C. Priester, G. Allan, and M. Lannoo // Physical Review B. – 1984. – Vol. 29. – No.6. – P. 3408-3411.
4. Monozon, B.S. Resonant impurity and exciton states in a narrow quantum well / B.S. Monozon and P. Schmelcher // Physical Review B. – 2005. – Vol. 71. – P. 085302-1-085302-13.
5. Yen, S.T. Theory of resonant states of hydrogenic impurities in quantum wells / S.T. Yen // Physical Review B. – 2002. – Vol. 66. – P. 075340-1-075340-7.
6. Blom, A. Resonant states induced by impurities in heterostructures / A. Blom, M.A. Odnoblyudov, I.N. Yassievich, K.A. Chao // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65. – P. 155302: 1-9.
7. Fano, U. Effect of configuration interaction on intensities and phase shifts / U. Fano // Physical Review. – 1961. – Vol. 124. – P. 1866-1878.
8. Loehr, J.P. Effect of biaxial strain on acceptor-level energies in In_yGa_{1-y}As/Al_xGa_{1-x}As (on GaAs) quantum wells / J.P. Loehr and J. Singh // Physical Review B. – 1990. – Vol. 41. – No.6. – P. 3695-3701.
9. Li, E. H. Materials parameters of InGaAsP and InAlGaAs systems for use in quantum well structures at low and room temperatures / E. H. Li // Physica E. – 2000. – Vol. 5. – P. 215-273.

10. Altukhov, I.V. Towards Si_{1-x}Ge_x quantum-well resonant-state terahertz laser / I.V. Altukhov, E.G. Chirkova, V.P. Sinis, M.S. Kagan, Yu.P. Gusev, S.G. Thomas, K.L. Wang, M.A. Odnoblyudov, I.N. Yassievich // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 3909-3911.
11. Odnoblyudov, M.A. Theory of a strained *p*-Ge resonant-state terahertz laser / M.A. Odnoblyudov, A.A. Prokofiev, I.N. Yassievich, and K.A. Chao // Physical Review B. – 2004. – Vol. 70. – P. 115209: 1-14.
12. Blom, A. Mechanism of terahertz lasing in SiGe/Si quantum wells / A. Blom, M.A. Odnoblyudov, H.H. Cheng, I.N. Yassievich, K.A. Chao // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 713-715.

Список публикаций автора по теме диссертации

- [A1] Алешкин, В.Я. Примесное поглощение света с участием резонансных состояний мелких доноров в квантовых ямах / В.Я.Алешкин, Л.В.Гавриленко // ЖЭТФ, 2004, т. 125, вып. 6, С. 1340.
- [A2] Алешкин, В.Я. Расчет состояний мелких доноров в квантовых ямах в магнитном поле методом разложения по плоским волнам / В.Я. Алешкин, Л.В. Гавриленко // ФТП. — 2005. — Т. 39. — С. 63—70.
- [A3] Алешкин, В.Я. Резонансы Фано в спектрах примесного фототока в полупроводниках, легированных мелкими донорами / В.Я. Алешкин, А.В. Антонов, Л.В. Гавриленко, В.И.Гавриленко // ЖЭТФ. — 2005. — Т. 128. — С. 822—830.
- [A4] Алешкин, В.Я. Резонансные состояния мелких доноров в квантовых ямах / В.Я.Алешкин, Л.В.Красильникова // IV Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опти- и нанoeлектронике: Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 3-6 декабря, 2002, - С.69.
- [A5] Алешкин, В.Я. Дипольные переходы электронов между локализованными и резонансными состояниями мелких доноров в квантовых ямах/ В.Я. Алешкин, Л.В. Красильникова // Нанофотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 17—20 марта 2003. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2003. — Т. 2. — С. 347-350.
- [A6] Aleshkin, V.Ya. Resonant states of shallow donors in AlGaAs/GaAs quantum well heterostructure / V.Ya. Aleshkin, L.V. Krasilnikova // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 11th Int. Symp., St. Petersburg, June 22—28, 2003. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2003. — P. 70-71.

- [A7] Алешкин, В.Я. Оптические переходы электронов между локализованными и резонансными состояниями мелких доноров в квантовых ямах/ В.Я.Алешкин, Л.В.Красильникова // VI Российская конференция по физике полупроводников: Тез. докл., Санкт-Петербург, Россия, 27—31 октября 2003. — СПб: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2003. — С. 426-428.
- [A8] Алешкин, В.Я. Поглощение света при переходах электронов между локализованными и резонансными состояниями мелких доноров в квантовых ямах/ В.Я.Алешкин, Л.В.Гавриленко // XV Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников: Тез. докл. Екатеринбург-Кыштым, 16-21 февраля 2004. — Екатеринбург: ИФМ УРО РАН, 2004. — С. 61-62.
- [A9] Алешкин, В.Я. Расчет состояний мелких доноров в квантовых ямах в магнитном поле методом разложения по плоским волнам / В.Я.Алешкин, Л.В.Гавриленко // Нанопотоника: Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, Россия, 2—6 мая 2004. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. — С. 338-341
- [A10] Gavrilenko, L.V. Method for shallow donor states calculation in quantum well in magnetic fields / L.V.Gavrilenko, V.Ya.Aleshkin // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 12th Int. Symp., St. Petersburg, June 21—25, 2004. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2004. — P. 278-279.
- [A11] Aleshkin, V.Ya. Phonon width of shallow donor resonant state in quantum well heterostructures AlGaAs/GaAs / V.Ya. Aleshkin, L.V. Gavrilenko // 11th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter: Proc. 12th Int. Symp., St. Petersburg, Russia, July 25-30, 2004. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2004. — P. 103-104.
- [A12] Алешкин, В.Я. Электронный транспорт в гетероструктурах с квантовыми ямами, легированных мелкими донорами / В.Я. Алешкин, Л.В. Гавриленко, А.А. Дубинов // Нанопотоника и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2005. — Нижний Новгород: ИФМ РАН 2005. — С. 338-339.
- [A13] Алешкин, В.Я. Наблюдение резонанса Фано в спектре фототока в дельта-легированных донорами гетероструктурах GaAs/InGaAsP с квантовыми ямами / В.Я. Алешкин, А.В. Антонов, В.И. Гавриленко, Л.В. Гавриленко, Б.Н. Звонков // Нанопотоника и наноэлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2005. — Нижний Новгород: ИФМ РАН 2005. — С.431-432.

[A14] Gavrilenko, L.V. The Monte-Carlo simulation of transport in quantum well GaAs/AlGaAs heterostructure doped with shallow donors under impurity breakdown / L.V. Gavrilenko, V.Ya. Aleshkin and A.A. Dubinov // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13th Int. Symp., St. Petersburg, June 20—25, 2005. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. — P. 187-188.

[A15] Aleshkin, V.Ya. Phonon-induced photocurrent response in Si doped GaAs/InGaAsP quantum well heterostructures / V.Ya. Aleshkin, A.V. Antonov, V.I. Gavrilenko, L.V. Gavrilenko, B.N. Zvonkov // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 13th Int. Symp., St. Petersburg, June 20—25, 2005. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2005. — P. 378-379.

[A15] . Aleshkin, V.Ya Monte-Carlo simulation of population inversion between shallow donor ground state and free electron subband in GaAs/AlGaAs QW heterostructure under impurity breakdown / V.Ya. Aleshkin, L.V. Gavrilenko, A. A. Dubinov // Physics and Technology of THz Photonics: Proc. of 35th Workshop, Erice, Italy, July 20—26, 2005. — Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, 2005. — Th.2.3.

[A17] Алешкин, В.Я. Теория резонанса Фано в спектре примесного фототока в полупроводниках, легированных мелкими донорами / В.Я. Алешкин, Л.В. Гавриленко // VII Росс. конф. по физике полупроводников: Тез. докл., Звенигород, Россия, 18—23 сентября 2005. — М.: ФИАН. — С. 61.

[A18] Алешкин, В.Я. Резонансы Фано в спектре фототока легированных полупроводников и гетероструктур с квантовыми ямами / В.Я. Алешкин, А.В. Антонов, Л.В. Гавриленко, В.И.Гавриленко // Нанозфизика и нанозлектроника: Материалы всероссийского симпозиума, Нижний Новгород, ИФМ РАН, 2006. — Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2006. — Т. 2. — С. 316-317.

[A19] Gavrilenko, L.V. Fano resonances in photocurrent spectra of semiconductors and quantum well heterostructures doped with shallow donors / L.V. Gavrilenko, V.Ya. Aleshkin, A.V. Antonov, and V.I Gavrilenko // Nanostructures: Physics and technologies: Proc. 14th Int. Symp., St. Petersburg, June 26—30, 2006. — St. Petersburg: Ioffe Institute, 2006. — P. 164-165.

[A20] Aleshkin, V.Ya. Phonon induced resonances in impurity photocurrent spectra of bulk semiconductors and quantum wells doped by shallow donors / V.Ya. Aleshkin, A.V. Antonov, B.A. Andreev, L.V. Gavrilenko, and V.I. Gavrilenko // 28th International Conference on the Physics of Semiconductors: Proc. and Abstr., Vienna, Austria, June 28-July 3, 2006. — Vienna, ARCS, 2006. — FrM2g.12.

Гавриленко Людмила Владимировна

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ
МЕЛКИХ ДОНОРОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И ОБЪЕМНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Автореферат

Подписано к печати 26 октября 2006 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН,
603950, Нижний Новгород, ГСП-105

