

На правах рукописи

Петровская Анастасия Николаевна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА
ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ В СИСТЕМЕ
InGaAs/GaAs ПО ДАННЫМ СПЕКТРОСКОПИИ АДМИТТАНСА**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук, доцент Василий Иванович Зубков

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Михаил Михайлович Соболев
кандидат физико-математических наук, Сергей Юрьевич Карпов

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2008 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

В.А. Мошников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важную группу материалов микро- и нанoeлектроники составляют полупроводниковые гетероструктуры, представляющие собой последовательность из различных полупроводников с отличающимися значениями ширины запрещенной зоны. Широкий спектр подобных структур открывает практически неограниченные перспективы в плане управления важнейшими оптическими и электронными свойствами приборов. Основное внимание исследователей сконцентрировано на структурах, созданных на основе соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворах. Это во многом обусловлено их широким использованием в качестве материалов для приборов высокочастотной электроники и оптоэлектроники. Наличие размерного квантования в гетероструктурах является причиной возникновения уникальных явлений и свойств, которые позволяют создавать новое поколение электронных приборов. Среди основных преимуществ применения указанных материалов в микро- и нанoeлектронике можно выделить следующие:

- использование новых материалов позволяет поддерживать существующую в последние десятилетия тенденцию дальнейшей миниатюризации микросхем;
- за счет комбинаций различных полупроводников (с целью создания гетеропереходов, например) можно с достаточной степенью точности регулировать свойства материалов под определенные цели применения;
- используя твердые растворы полупроводников, можно регулировать электронные и оптические свойства материала выбором состава раствора.

В частности, система твердых растворов $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ активно используется для создания лазеров на основе квантовых ям (КЯ) и квантовых точек (КТ). Такие приборы служат для генерации излучения в области ближнего инфракрасного диапазона и широко применяются в волоконно-оптических линиях связи [1]. Вместе с тем, несмотря на широкое использование полупроводниковых структур на основе твердых растворов $A^{III}B^V$, некоторые их важные параметры до сих пор являются изученными недостаточно. В частности, для большинства соединений данной системы нет достоверных сведений о величине разрыва зон на гетерогранице. Разрыв зон является основным параметром, определяющим работу приборов на полупроводниковых гетероструктурах, поскольку он формирует квантовую яму, а следовательно и определяет энергетический спектр в зоне проводимости и в валентной зоне, энергии разрешенных переходов, определяющие длину волны излучения прибора, величину накопленного структурой заряда. Таким образом, проведение точной диагностики основных параметров полупроводниковых гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$, и, в частности, твердых растворов $In_xGa_{1-x}As/GaAs$, на сегодняшний день являет-

ся актуальной задачей.

Среди существующих в настоящее время экспериментальных методов исследования полупроводников метод спектроскопии адмиттанса зарекомендовал себя как эффективный неразрушающий метод исследования, позволяющий определять ряд основных электрофизических параметров полупроводника содержащего объекты низкой размерности. В сочетании с моделированием и численными расчетами этот метод количественного анализа дает информацию об энергетическом спектре исследуемых структур. Однако до сих пор с помощью вольт-фарадных измерений можно было получить информацию только об одной из подсистем: либо для электронной подсистемы, либо для дырочной, - в зависимости от типа проводимости исследуемого полупроводника. В настоящей работе предлагается метод характеристики гетероструктур с КЯ на основе спектроскопии адмиттанса и численного моделирования, позволяющий получать информацию об энергетических параметрах обеих подсистем. Это позволяет полностью определять энергетический спектр гетероструктур и далее характеризовать их параметры с точки зрения приборного применения.

Объектом исследования в работе являлись полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ различной ширины и состава, в том числе ультратонкие квантовые ямы InAs/GaAs шириной 1.2 монослоя.

Целью работы является развитие методов анализа энергетического спектра электронной и дырочной подсистем гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ на основе вольт-фарадного профилирования и измерения спектров проводимости с использованием численного моделирования и подгонки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. разработка способа определения параметров энергетического спектра электронной и дырочной подсистем для легированной полупроводниковой гетероструктуры с квантовыми ямами из вольт-фарадных характеристик (ВФХ);
2. определение влияния параметров активной области – ширины и глубины КЯ, концентрации легирующей примеси, - а также приложенного внешнего поля на вид самосогласованного потенциала Хартри и на энергетический спектр гетероструктур с квантовыми ямами на основе данных эксперимента;
3. получение на основе анализа экспериментальных данных адмиттанса количественной информации о величине заряда, накапливаемого в гетероструктурах с одиночными КЯ, и температурной зависимости разрыва зоны проводимости в этих гетероструктурах;
4. анализ экспериментальных температурных спектров проводимости и

ВФХ для гетероструктур с ультратонкими КЯ InAs/GaAs.

Научная новизна работы:

1. определены энергии уровней квантования как в зоне проводимости, так и в валентной зоне для изотипных гетероструктур *n*-типа на основе легированных полупроводников с одиночной напряженной квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с использованием реального профиля энергетических зон, полученного в результате самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера;
2. в температурном диапазоне от 320 К до 100 К методом подгонки наблюдаемого в эксперименте концентрационного профиля установлено, что величина разрыва зоны проводимости для напряженных КЯ $\text{In}_{0.225}\text{Ga}_{0.775}\text{As}/\text{GaAs}$ остается постоянной и равной 172 мэВ в пределах экспериментальной погрешности (± 10 мэВ);
3. показано, что заряд, определяемый по наблюдаемому из ВФХ концентрационному профилю, соответствует истинной величине заряда в КЯ при условии полной ионизации примеси и превышает истинную величину при уменьшении степени ионизации;
4. проведен анализ влияния ширины активной области, глубины квантовой ямы, а также уровня легирования прилегающих к активной области слоев на энергии уровней квантования как в зоне проводимости, так и в валентной зоне для гетероструктур с напряженными КЯ InGaAs/GaAs;
5. на основе анализа экспериментальных спектров проводимости и ВФХ получены значения энергии активации и величины накопленного заряда для ультратонких квантовых ям смачивающих слоев InAs/GaAs.

Практическая ценность работы заключается в развитии метода характеристики наногетероструктур и определении энергий уровней квантования и соответствующих им волновых функций как в зоне проводимости, так и в валентной зоне, на основе экспериментальных данных спектроскопии адмиттанса и самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера. Эти данные позволяют оценивать энергии разрешенных межзонных переходов и представляют собой важную информацию, необходимую для создания высококачественных приборов с заданными характеристиками.

Создано программное обеспечение, позволяющее моделировать энергетический спектр зоны проводимости и валентной зоны гетероструктур, содержащих квантовые ямы.

Определены оптимальные параметры активной области легированной гетероструктуры с квантовой ямой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ необходимые для создания эффективных источников одномодового излучения.

Показана эффективность применения спектроскопии адмиттанса для характеристики ультратонких КЯ и получены точные количественные данные об энергии активации и величине накопленного заряда в смачи-

вающих слоях InAs/GaAs.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ экспериментальных данных, полученных методом спектроскопии адмиттанса, и численное моделирование позволяют получать количественную информацию об энергетическом спектре как электронной, так и дырочной подсистем для легированных полупроводниковых гетероструктур, содержащих квантовые ямы.
2. В температурном диапазоне от 320 К до 100 К величина разрыва зоны проводимости для гетероструктур с одиночными напряженными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x = 0.225$) остается постоянной и равной 172 мэВ в пределах экспериментальной погрешности (± 10 мэВ).
3. Величина заряда, определяемого по наблюдаемому из ВФХ концентрационному профилю, соответствует истинной величине заряда в КЯ при условии полной ионизации примеси. При понижении температуры заряд, определяемый из ВФХ, монотонно увеличивается по сравнению с истинным, что объясняется эффектом полной ионизации примеси в методе ВФХ при приложенном обратном смещении.
4. Анализ экспериментальных данных спектроскопии адмиттанса позволяет достоверно зарегистрировать наличие уровней квантования в структурах со смачивающими слоями и определить энергии активации этих уровней, а также заряд в ультратонких КЯ толщиной $1 \div 2$ монослоя.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и школах: 57-я Научно-техническая конференция, посвященная Дню Радио (Санкт-Петербург, апрель 2002 г.); Десятая Всероссийская Научная Конференция Студентов-Физиков и Молодых Ученых ВНКСФ-10 (Екатеринбург–Красноярск, 2004 г.); 11-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика-2004» (Зеленоград, 21-23 апреля 2004 г.); VI международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (Ульяновск, 4-8 октября 2004 г.); 2-nd International Conference «Physics of electronic materials» (Kaluga, May 24-27, 2005). Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 18-19 ноября 2005 г.); VI Международная научная конференция «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии» (Кисловодск, 17-22 сентября, 2006 г.); Девятая международная конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (Томск, 3-5 октября, 2006 г.); XIV Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)» (Москва, 11-13 сентября, 2008 г.); а также конференции профессорско-преподавательского состава

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 2005-2008 гг.; региональные молодежные научные школы по твердотельной электронике «Микро- и нанотехнологии», Санкт-Петербург, 2003 г.; «Физика и технология микро- и наноструктур», Санкт-Петербург, 2004 г.; «Актуальные аспекты нанотехнологии», Санкт-Петербург, 2005 г., «Нанотехнологии и нанодиагностика», Санкт-Петербург, 2006 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них – 1 статья, которая входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК России, и 7 работ в материалах и трудах международных научных конференций и симпозиумов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 82 наименования. Основная часть работы изложена на 134 страницах машинописного текста. Работа содержит 58 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цель и задачи диссертационной работы, сформулирована научная новизна, практическая значимость полученных в работе результатов и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор литературы по вопросам исследования полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами. Рассмотрены физические основы спектроскопии адмиттанса. Рассмотрены основные существующие экспериментальные методики исследования гетероструктур с квантовыми ямами. Обращено внимание, что ВФХ являются косвенным методом характеристики электрофизических параметров материала. Для получения количественной информации следует проводить обработку экспериментальных данных, включающую моделирование и численный расчет. Для моделирования квантоворазмерных структур в последнее время эффективно стала использоваться процедура самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона

Затронут вопрос влияния упругих напряжений на энергетический спектр квантоворазмерных структур. Представлен обзор справочной информации для материалов GaAs, InAs и твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

На основании проведенного анализа литературы формулируются цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводятся принципы метода вольт-фарадного профилирования и особенности его применения для гетероструктур с квантовыми ямами.

Для исследования были специально изготовлены высококачественные образцы, выращенные методом химического осаждения из паров металло-

органических соединений (MOCVD) на n^+ -GaAs подложке с ориентацией (001). Уровень легирования подложки составлял 10^{18} см^{-3} . Толщина КЯ 6.0...9.5 нм, содержание In $x = 0.065...0.29$. Для предотвращения диффузии примесей (в качестве легирующей примеси использовался Si) и дефектов из подложки в активную часть гетероструктуры вблизи ямы легирование прекращалось. Толщина нелегированных слоёв (спейсеров) i -GaAs вблизи КЯ составляла 5 нм. Сама квантовая яма также не легировалась. Активная область находилась между двух слоёв GaAs шириной, соответственно, 300 нм (верхний, или кэп-слой) и 350 нм (нижний), равномерно легированных Si в процессе роста до $(6-7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. КЯ росли псевдоморфно, измерения рентгеновских кривых качания подтвердили, что квантовые ямы были упруго напряженными. Сверху образца путем напыления серебра изготавливался выпрямляющий контакт Шоттки, а снизу - омический контакт, что необходимо для проведения измерений адмиттанса.

На рис. 1 представлены экспериментальные ВФХ и спектры проводимости КЯ при различных условиях эксперимента: температуре, частоте тестового сигнала, приложенном обратном смещении.

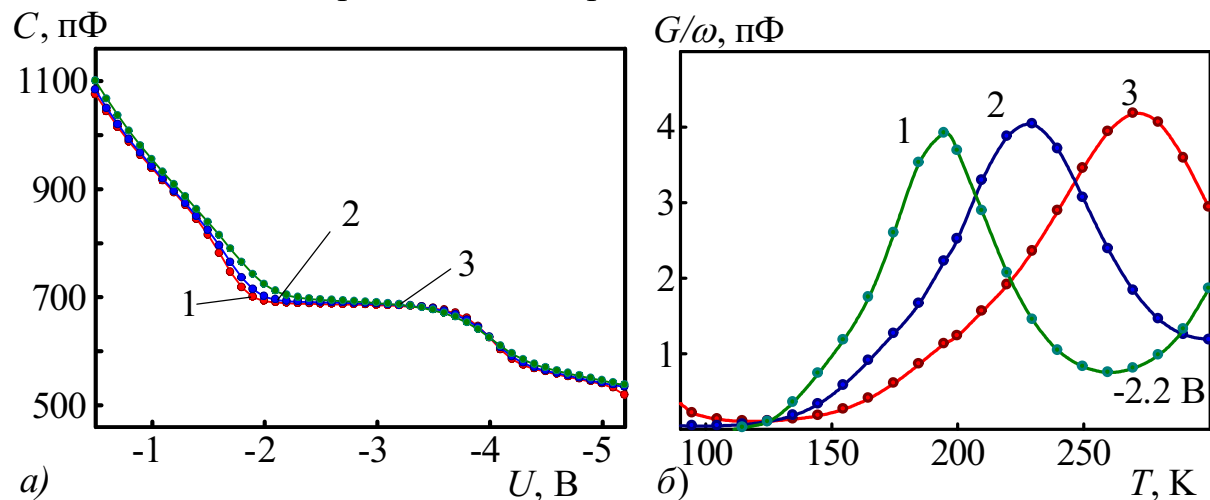


Рис. 1 а) экспериментальные ВФХ: 1 – 75 К, 2 – 125 К, 3 – 195 К; б) температурные спектры проводимости при напряжении обратного смещения 2.2 В: 1 – 1 кГц, 2 – 10 кГц, 3 – 100 кГц. Ширина КЯ 7.4 нм, состав тв. раствора по In, $x = 0.225$

По ВФХ рассчитывается наблюдаемый концентрационный профиль основных носителей заряда методом численного дифференцирования по формуле

$$n(w) = \frac{C^3}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \left(\frac{dC}{dU} \right)^{-1}, \quad w = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{C}, \quad (1)$$

где n – концентрация основных носителей заряда, w – ширина области объемного заряда, C – емкость, U – обратное смещение, S – площадь контакта Шоттки, ϵ – диэлектрическая проницаемость.

При анализе экспериментальных данных ВФХ впервые достоверно зафиксировано смещение пика наблюдаемого концентрационного профи-

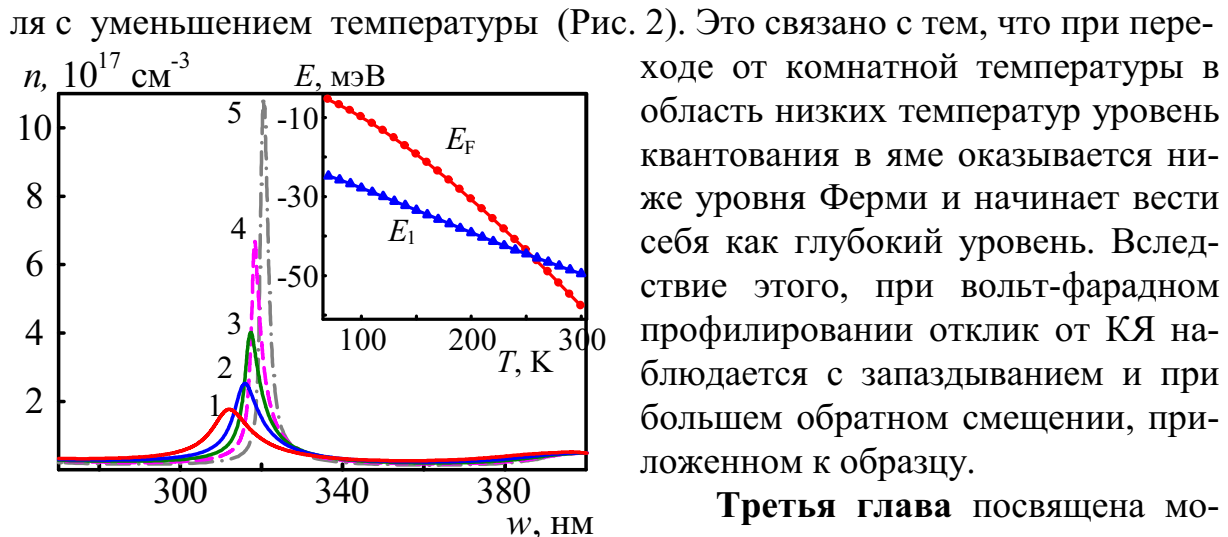


Рис. 2 Наблюдаемые концентрационные профили при различных температурах, К: 1 – 300, 2 – 250, 3 – 200; 4 – 155; 5 – 75. Ширина КЯ 7.4 нм, состав твердого раствора по In, $x = 0.225$. На вставке: температурная зависимость уровня Ферми и уровня квантования в яме.

и Шредингера при построении ВФХ [2], подгонка наблюдаемого профиля концентрации основных носителей заряда, а также получение значения разрыва зоны проводимости.

При разработке математического алгоритма учитывалось влияние упругих напряжений на энергетический спектр гетероструктур с КЯ, которые возникают при эпитаксиальном росте слоев из-за рассогласования постоянных решеток материалов гетеропары. Возникающая при псевдоморфном росте дисторсия элементарной ячейки InGaAs приводит к существенному изменению энергетических параметров напряженного слоя: к увеличению ширины запрещенной зоны, изменению величин разрывов зон и расщеплению потолка валентной зоны [3]. Величина расщепления в валентной зоне в исследуемом диапазоне составов ($x > 0.2$) для твердого раствора InGaAs превышает величину разрыва валентной зоны, поэтому при расчете энергии уровней квантования можно ограничиться только подзоной тяжелых дырок.

Определение энергии связанных состояний и соответствующих им волновых функций было реализовано в одном расчетном цикле, как для зоны проводимости, так и для валентной зоны. На Рис. 3 представлены результаты расчета уровней квантования и соответствующих им волновых функций для реального профиля краев энергетических зон, полученного в результате самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера, а также для сравнения в приближении прямоугольного вида зон.

Это связано с тем, что при переходе от комнатной температуры в область низких температур уровень квантования в яме оказывается ниже уровня Ферми и начинает вести себя как глубокий уровень. Вследствие этого, при вольт-фарадном профилировании отклик от КЯ наблюдается с запаздыванием и при большем обратном смещении, приложенном к образцу.

Третья глава посвящена моделированию энергетического спектра гетероструктур с напряженными квантовыми ямами и сравнению с экспериментом. В основе моделирования энергетического спектра лежит самосогласованный расчет уравнений Пуассона

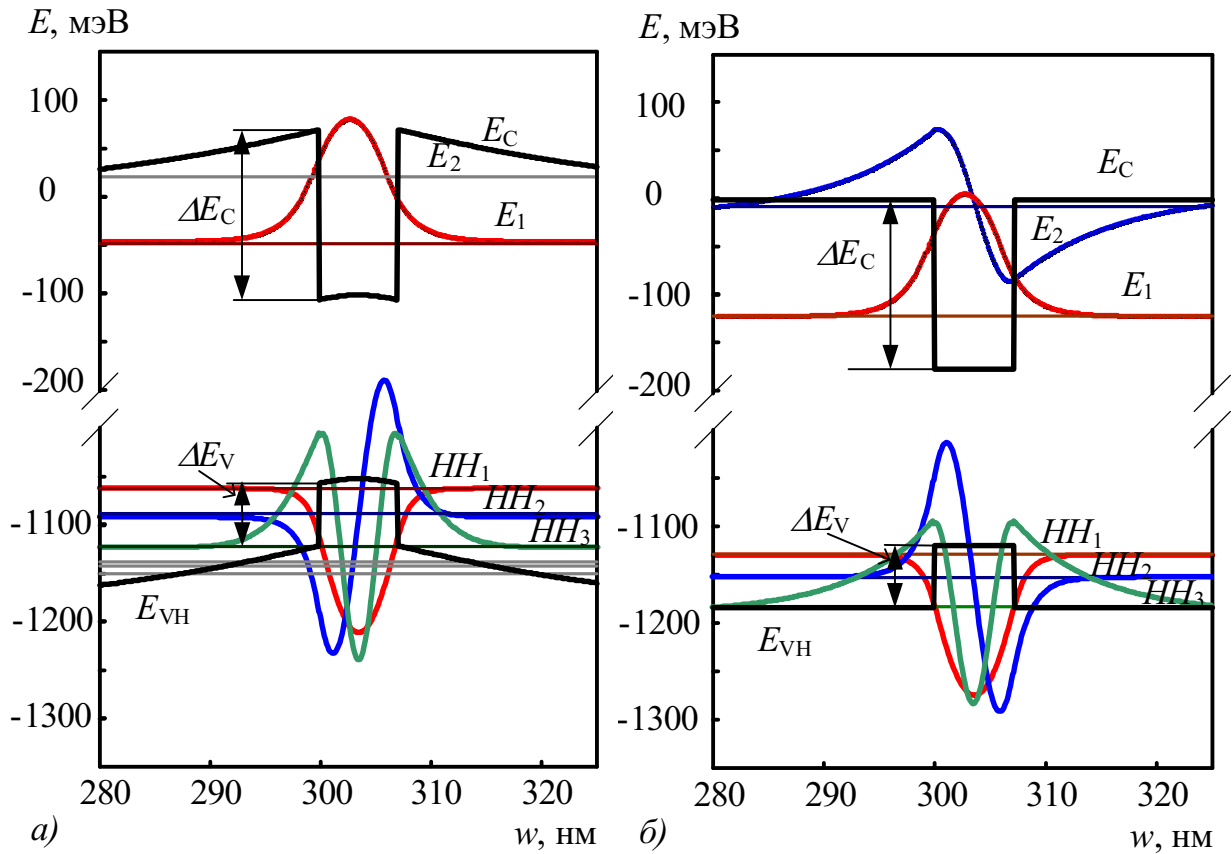


Рис. 3 Расчет энергий уровней квантования и соответствующих им волновых функций в КЯ зоны проводимости и подзоны тяжелых дырок. а) реальный профиль энергетических зон; б) прямоугольное приближение. КЯ шириной 7.2 нм, состав тв. раствора по In, $x=0.23$ (разрыв зоны проводимости 170 мэВ, валентной - 64 мэВ), $U = 0$ В и $T = 300$ К.

Накопление огромного количества носителей заряда в активной области КЯ приводит к тому, что энергетический профиль зоны проводимости сильно модифицируется по сравнению с прямоугольным приближением. Изменение профиля потенциальной ямы происходит вследствие кулоновского отталкивания и влечет за собой изменение положения связанного уровня.

Для нахождения энергий связанных уровней и соответствующих им волновых функций для одиночных КЯ InGaAs/GaAs с помощью численных методов решалось одномерное уравнение Шредингера в приближении эффективной массы:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dx^2} \psi_i(x) + U(x)\psi_i(x) = E_i\psi_i(x), \quad (2)$$

где \hbar - постоянная Планка, m^* - эффективная масса основных носителей заряда, зависящая от координаты, $\psi_i(x)$ - волновая функция, E_i - собственное значение, $U(x)$ - профиль потенциальной энергии.

На границах расчетной области волновая функция должна удовлетворять граничным условиям Дирихле, а на гетерогранице волновая функция

и ее первая производная должны быть непрерывны. Полученная система уравнений решалась в матричном виде:

$$A\psi = E\psi, \quad (3)$$

где A – симметричная матрица, все элементы которой, кроме элементов главной диагонали и примыкающих к ней диагоналей, равны нулю.

Размер матрицы зависит от количества точек в расчетной сетке. Выбор шага определяется противоречивыми требованиями точности и скорости расчета. В связи с этим для расчета КЯ принципиальным является использование неоднородного шага сетки. Однако его использование влечет за собой разрушение симметрии матрицы [4]. Мы применили к нашим расчетам метод решения уравнения Шредингера с использованием неравномерного шага за счет введения дополнительного параметра в уравнение и использования дополнительных матричных преобразований. Программно моделирование и расчет энергетического спектра гетероструктур с КЯ реализованы в среде графического программирования LabVIEW. Для критических к быстрдействию вычислений совместно использовались LabVIEW и MatLab.

На основе подгонки к экспериментальным ВФХ определяется величина разрыва зоны проводимости и реальный профиль дна зоны проводимости. Далее исходя из того факта, что ширина запрещенной зоны полупроводника в каждой точке материала есть величина постоянная, можно из полученного профиля дна зоны проводимости определить реальный профиль потолка валентной зоны.

В предлагаемой нами процедуре самосогласованного решения энергии связанных состояний и волновые функции рассчитываются как для зоны проводимости, так и для валентной зоны в одном расчетном цикле, в том числе и при наличии внешнего электрического поля, на основе экспериментальных данных. Это позволяет оценить энергии межзонных переходов, а также интеграл перекрытия волновых функций (Рис. 4), квадрату которого прямо пропорциональна вероятность переходов:

$$\int \psi_{e,n}^*(x) \psi_{h,n'}(x) dx = P_{n,n'} \quad (4)$$

где $\psi_{e,n}$ - волновая функция соответствующего уровня в зоне проводимости, $\psi_{h,n'}$ - волновая функция в валентной зоне, $P_{n,n'}$ - интеграл перекрытия волновых функций.

Так, для КЯ, представленной на Рис. 3 интеграл перекрытия для перехода E_1 - HH_1 составляет 0.96, а для перехода E_1 - HH_2 - всего 0.002 (E_1 – первый связанный уровень в КЯ зоны проводимости, $HH_{1,2}$ – первый (второй) связанный уровень в КЯ валентной зоны для тяжелых дырок), что полностью коррелирует с правилами отбора.

Далее, зная энергии уровней квантования КЯ зоны проводимости и

валентной зоны, можно оценить энергию разрешенного межзонного перехода E_1 - HH_1 гетероструктуры с КЯ с заданным составом твердого раствора и шириной активной области (Рис. 5).

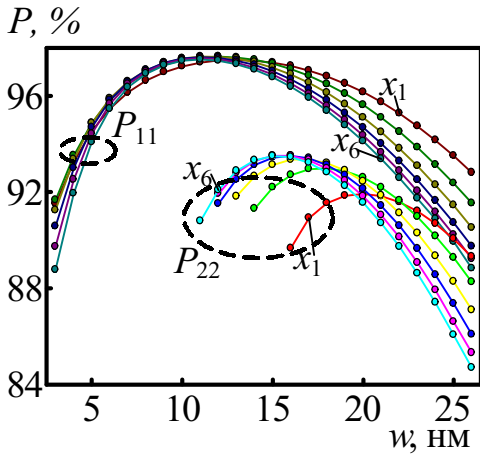


Рис. 4 Зависимость интеграла перекрытия волновых функций разрешенных межзонных переходов от ширины ямы для различных составов твердого раствора $In_xGa_{1-x}As$ $x_1 \dots x_6$: 0.05...0.3 шаг 0.05. P_{11} – переход E_1 - HH_1 , P_{22} – переход E_2 - HH_2

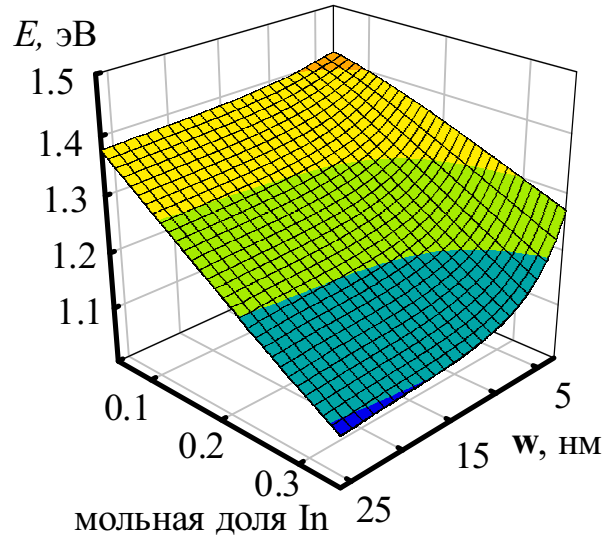


Рис. 5 Самосогласованный расчет зависимости энергии разрешенного межзонного перехода E_1 - HH_1 от ширины и глубины КЯ для гетероструктуры с концентрацией легирующей примеси в барьерах $n = 6.55 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Увеличение как ширины ямы, так и глубины позволяет получить меньшую энергию межзонного перехода E_1 - HH_1 . Однако по глубине ямы существует ограничение псевдоморфного роста слоев предельным составом твердого раствора по In 0.34. С другой стороны, по ширине ямы также существует ограничение критической толщиной, до которой слои растут псевдоморфно. Для активной области $In_{0.3}Ga_{0.7}As$ критическая толщина составляет 15 нм. На зависимости энергии межзонного перехода E_1 - HH_1 от ширины активной области явно выражено насыщение для ям, ширина которых превышает 10 нм (Рис. 5). Это связано с появлением в зоне проводимости в широких ямах второго уровня квантования, что приводит к изменению энергии первого уровня. Изменение энергии перехода E_1 - HH_1 обнаружено и на зависимости от ширины КЯ при различных значениях концентрации легирующей примеси в прилегающих к активной области слоях (Рис. 6). Таким образом, концентрацией примеси также можно регулировать свойства гетероструктур с КЯ в разумных относительных пределах. Отметим, что прямоугольное приближение игнорирует значение концентрации в барьерах; только самосогласованный расчет потенциала Хартри позволяет учесть ее влияние.

Можно сделать вывод, что оптимальный размер активной области лежит в пределах от 8 до 10 нм, когда наблюдается максимальная вероятность перехода и отсутствует второй уровень квантования в зоне проводимости. Для получения нужной энергии перехода в этом случае можно

варьировать состав твердого раствора и в относительных пределах концентрации легирующей примеси.

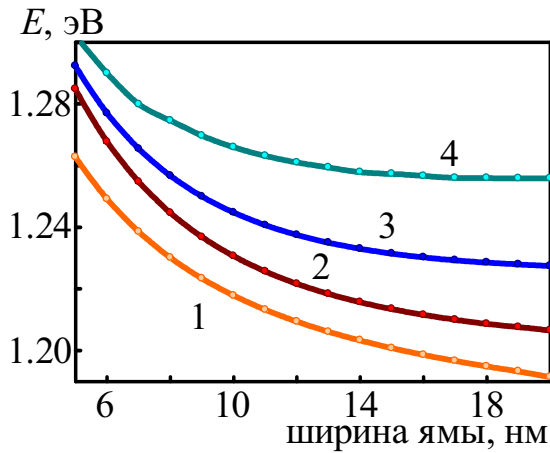


Рис. 6 Рассчитанная зависимость энергии перехода E_1-NH_1 от ширины ямы при концентрациях легирующей примеси $n [10^{16} \text{см}^{-3}]$: 1 – 10, 2 – 6.5, 3 – 2, 4 – 0.5. Состав тв. раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x = 0.23$.

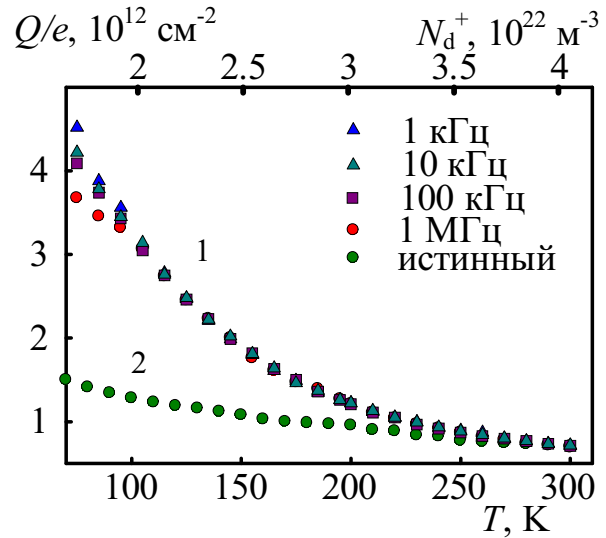


Рис. 7 Поверхностная плотность заряда в КЯ: 1 – по экспериментальным ВФХ, 2 – по истинному концентрационному профилю. На верхней шкале абсцисс – степень ионизации примеси.

По ВФХ, измеренным в температурном диапазоне от 320 К до 100 К, методом подгонки наблюдаемого и моделируемого концентрационных профилей определялось значение разрыва зоны проводимости при различных температурах для образца $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с составом твердого раствора по In 0.225. В пределах допустимой погрешности эксперимента (± 10 мэВ) величина разрыва зоны проводимости оставалась постоянной и равной 172 мэВ.

Ранее в работе [5] постулировалось сохранение заряда, определяемого по наблюдаемым из экспериментальных ВФХ концентрационным профилям, и заряда, соответствующего истинному распределению концентрации. Выполненные нами прецизионные измерения на образцах с КЯ совместно с моделированием показывают, что это утверждение справедливо при условии полной ионизации примеси. С понижением температуры заряд, определяемый по экспериментальным данным, монотонно увеличивается по сравнению с истинным (Рис. 7), что мы объясняем условием полной ионизации примеси в методе ВФХ при приложенном обратном смещении.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты и анализ вольт-фарадного профилирования и спектров проводимости ультратонких квантовых ям смачивающих слоев КТ InAs/GaAs .

В настоящее время самоорганизующиеся КТ в системе InAs/GaAs выращиваются по механизму Странского-Крастанова в процессе самоорганизации из тонкого смачивающего слоя, толщина которого составляет примерно $1.5 \div 2$ монослоя. В отличие от расположенных отдельно друг от дру-

га на поверхности наноструктуры квантовых точек, смачивающий слой распределен по всей поверхности структуры и может рассматриваться как ультратонкая квантовая яма. Несмотря на малые размеры смачивающего слоя, его двумерная (в отличие от массива квантовых точек) плотность состояний потенциально способна аккумулировать значительное количество носителей заряда. Однако, роль смачивающего слоя в накоплении носителей заряда и формировании общей плотности состояний массива самоорганизующихся квантовых точек до сих пор не выяснена. Кроме того, ультратонкие слои InAs в GaAs – это единственная возможность изучить зонную структуру напряженного гетероперехода InAs/GaAs, поскольку критическая толщина для псевдоморфного слоя этой системы всего 1.7 монослоя из-за сильного рассогласования параметров решеток (7 %).

Образцы для исследования были изготовлены в Институте Физики Твердого Тела г. Берлин. На поверхность полуизолирующей подложки n^+ -GaAs ориентированной в направлении $\langle 001 \rangle$ осаждался n -слой GaAs, толщиной 2048 нм, легированный Si ($N_d = 1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). На глубине 1.6 мкм от поверхности подложки формировалась активная область структуры путем быстрого зарастивания осажденного слоя InAs толщиной 1.2 монослоя слоем GaAs толщиной 2.8 нм, что препятствовало формированию трехмерных островков InAs по механизму Странского – Крастанова. Поверх смачивающих слоев, разделенных барьерами из нелегированного GaAs, осаждался верхний слой n -GaAs толщиной 448 нм, с концентрацией легирующей примеси как в нижнем слое. Для формирования p - n -перехода формировался слой p -GaAs, легированного Zn ($N_a = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), толщиной 650 нм. В завершение, методом химического жидкостного травления из полученных заготовок формировались меза-структуры диаметром 800 мкм, а далее омические контакты.

С помощью измерителя RLC HP4284A проведен ряд вольт-фарадных измерений в широком температурном диапазоне (15... 250 К) при различных частотах тестового сигнала в диапазоне от 1 кГц до 1 МГц. Диапазон постоянного обратного смещения U_r определялся по вольт-амперным характеристикам. Полученные ВФХ в координатах $1/C^2$ от U на частоте 1 кГц при различных температурах представлены на Рис. 8.

Полученные спектры демонстрируют характерный для квантово-размерных гетероструктур с КЯ участок с постоянной емкостью (плато), который обусловлен аккумуляцией носителей заряда в КЯ. Плато на зависимостях для гетероструктуры лежат в диапазоне от -1.2...-3 В. С повышением температуры ширина плато уменьшается и сдвигается в область больших смещений, что связано с изменением положения уровня Ферми и понижением энергетических барьеров для эмиссии носителей заряда с ростом температуры.

В области низких температур, близких к гелиевым, ширина плато на

$1/C^2$ - U зависимости, снятой на 1 МГц увеличивается по сравнению с зависимостями, снятыми на меньших частотах тестового сигнала. Это связано с тем фактом, что на высоких частотах носители заряда не успевают эмитировать, и продолжают накапливаться в активной области гетероструктуры.

Методом численного дифференцирования ВФХ получено пространственное распределение концентрации основных носителей заряда. Наблюдаемые профили концентрации легирующей примеси для температуры 15 К и предельных частотах тестового сигнала 1 кГц и 1 МГц представлены на Рис. 9. На концентрационных профилях для исследуемых структур при различных условиях мы получили всего один пик, несмотря на то, что в активной области находятся три смачивающих слоя. Методом ВФХ не удастся получить пространственное разрешение трех КЯ шириной 1.2 монослоя, разделенных барьерами 2.8 нм.

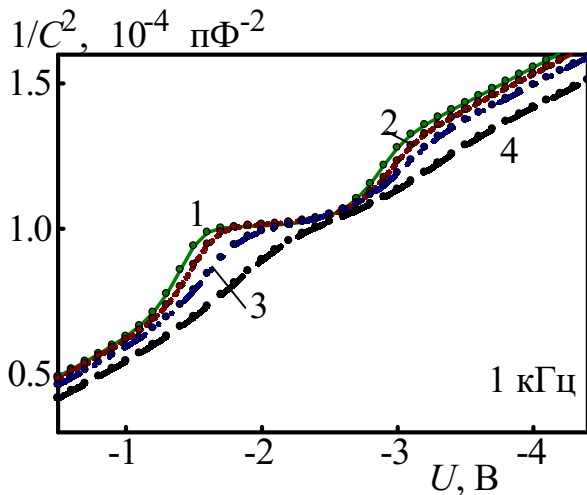


Рис. 8. Семейство $1/C^2$ - U характеристик гетероструктуры с тремя ультратонкими КЯ InAs/GaAs при различных температурах, К: 1 – 15; 2 – 60; 3 – 129,7; 4 – 244, на частоте тестового сигнала 1 кГц.

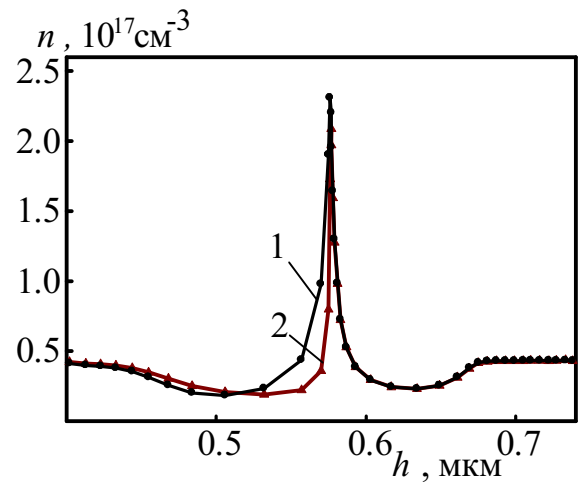


Рис. 9. Профили концентрации свободных носителей заряда в гетероструктуре с ультратонкими КЯ InAs/GaAs при $T = 15$ К на различных частотах: 1 – 1 МГц; 2 – 1 кГц.

Величина заряда, накопленного в активной области гетероструктуры, образованной тремя ультратонкими КЯ смачивающих слоев, является важной характеристикой с точки зрения оценки роли смачивающих слоёв в гетероструктурах с КТ с одной стороны, и для приборного применения с другой стороны. Оценка накопленного в КЯ заряда проводилась путем интегрирования площади под концентрационным профилем носителей заряда. В качестве границ интегрирования выбирались минимумы на профиле концентрации.

Спектры проводимости, полученные при измерении образцов с КЯ смачивающих слоев демонстрировали несколько пиков, соответствующих уровням квантования в квантовых ямах. Важной особенностью спектров является отсутствие температурной зависимости положения пиков от при-

ложенного смещения. Этот факт свидетельствует об отсутствии зависимости энергии активации от приложенного смещения. В то же время амплитуда максимумов пиков проводимости сильно меняется от приложенного смещения. На Рис. 10 представлены экспериментальные спектры проводимости при различных напряжениях обратного смещения для частоты тестового сигнала 1 МГц.

Для гетероструктур с КЯ наблюдалось смещение пиков в спектрах проводимости в область более высоких температур при увеличении частоты тестового сигнала, при этом амплитуда пика также возрастала. В зависимости от приложенного смещения для структур с квантовыми ямами наблюдаются 1, 2 или 3 максимума проводимости. Три пика в спектрах проводимости смачивающих слоев можно интерпретировать как 3 энергетических уровня, с которых происходит эмиссия носителей заряда. Тот факт, что на первый взгляд обратное смещение не влияет на температурное положение пиков проводимости (Рис. 10), за исключением третьего, говорит, что уровни не уширены.

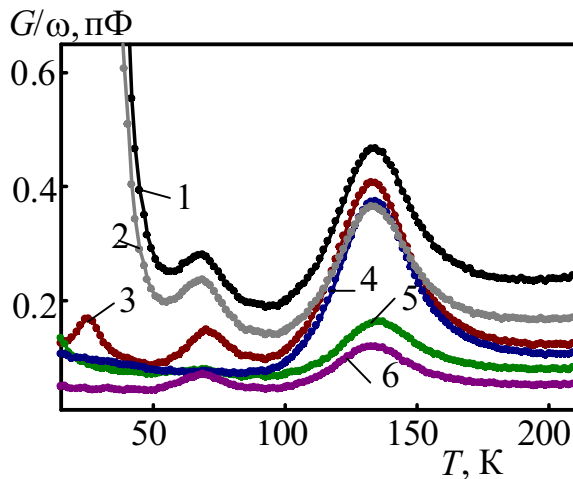


Рис. 10 Спектры проводимости при напряжениях обратного смещения, В: 1 – 0.5; 2 – 1.5; 3 – 2.5; 4 – 3; 5 – 4.3, на частоте 1 МГц

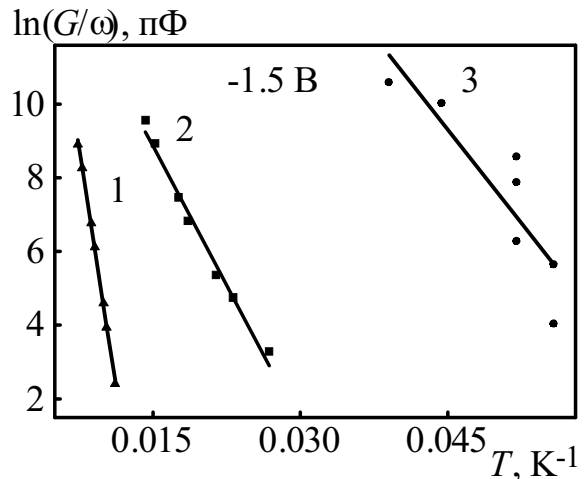


Рис. 12. Графики Аррениуса, построенные при напряжении обратного смещения 1,5 В: 1 – первый, 2 – второй, 3 – третий уровни квантования соответственно.

Температурное сканирование проводимости образца осуществлялось при различных частотах ω тестового сигнала, обеспечивая тем самым разные динамические условия для эмиссии носителей заряда из квантовых ям. Это позволило построить графики Аррениуса в координатах $\omega = f(1/T)$ для положений температурных максимумов спектров проводимости (Рис. 11), по которым определяется энергия активации, характеризующая положение уровней квантования в гетероструктуре. Определенная из графиков Аррениуса наблюдаемая (apparent) энергия активации двух нижних уровней не зависела от приложенного смещения и составила 148 мэВ и 44.2 мэВ соответственно, а для верхнего - очень сильно зависела от приложенного смещения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита методика спектроскопии адмиттанса в применении к определению энергетических параметров гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs, которые являются перспективными материалами нанoeлектроники.
2. разработан метод определения энергий уровней квантования и соответствующих им волновых функций для легированных полупроводниковых гетероструктур с КЯ для обеих подсистем: электронной и дырочной, на основе экспериментальных данных адмиттанса и самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера;
3. впервые экспериментально показано, что сохранение заряда накапливаемого в КЯ, определяемого по наблюдаемому концентрационному профилю, и заряда, определяемого по истинному концентрационному профилю, выполняется при условии полной ионизации примеси, при низких температурах заряд, определяемый из экспериментальных ВФХ растет монотонно по отношению к истинному заряду в КЯ, что связано с эффектом полной ионизации примеси в методе ФВХ;
4. проведен анализ влияния параметров квантовой ямы (ширины, глубины), концентрации легирующей примеси на самосогласованный потенциал Хартри и энергетический спектр гетероструктур с КЯ;
5. предложен метод определения оптимальных параметров гетероструктур с квантовыми ямами для получения эффективных источников одномодового излучения;
6. методом подгонки наблюдаемых концентрационных профилей, получаемых из ВФХ для $\text{In}_{0.225}\text{Ga}_{0.775}\text{As}/\text{GaAs}$ КЯ и рассчитываемых, проведено температурное исследование разрыва зоны проводимости.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Bimberg, D. Quantum Dot Heterostructures / Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N.N. – Chichester: Wiley, 1999. – 328 p.
2. Зубков, В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. СПб.: ООО «Техномедиа» / Изд-во «Элмор», 2007. 220 с.
3. Zory, P.S. Quantum well lasers. New Jersey: Academic Press, 1993. –504 p.
4. Tan, I.-H. A self-consistent solution of Schrödinger-Poisson equations using a nonuniform mesh / Tan I.-H., Snider G.L., Chang L.D., Hu E.L. // J. Appl. Phys. - 1990. - Vol. 68, N 8. - P. 4071-4076.
5. Kroemer, H. Measurement of isotype heterojunction barriers by C-V-profiling / Kroemer H., Chien Wu-Yi, J.S. Harris Jr., Edwall D.D. //Appl. Phys. Lett. – 1980. – Vol. 36, N 4. – P. 295-297.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Из перечня изданий, рекомендованных ВАК:

1. Кузнецова, А.Н. Спектроскопия проводимости гетероструктур с InAs/GaAs квантовыми ямами и квантовыми точками / Кузнецова А.Н., Шулгунова И.С., Скопина А.Е., Зубков В.И., Соломонов А.В. // Современные проблемы науки и образования. – 2007. - № 6. – С. 115-120.

и другие:

2. Зубков, В.И. Определение разрывов энергетических зон в напряженных квантовых ямах / Зубков В.И., Кучерова О.В., Кузнецова А.Н. // Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы: труды VI Междунар. конф., г. Сочи, 2004 г. - Ульяновск, 2004. - С.43.
3. Zubkov, V.I. Strained quantum well InGaAs/GaAs characterization by capacitance techniques [Характеризация напряженных квантовых ям InGaAs/GaAs емкостными методами] / V.I. Zubkov, O.V. Kucheroва, A.N. Kuznetsova // Physics of Electronic Materials: 2nd Int. Conf. Proc., Kaluga, Russia, 24-27 May, 2005. - Kaluga, KSPU Press, 2005. - Vol. 2. - P.243-246.
4. Кузнецова, А.Н. Использование LabVIEW для моделирования и определения энергетических параметров наноструктур с квантовыми точками и квантовыми ямами / Кузнецова А.Н., Шулгунова И.С. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: труды Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 18-19 нояб. 2005 г. – Москва, 2005. – С. 361.
5. Шулгунова, И.С. Спектроскопия полной проводимости квантоворазмерных гетероструктур InAs/GaAs / Шулгунова И.С., Зубков В.И., Кузнецова А.Н. // Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии: труды VI Междунар. науч. конф., г.Кисловодск, 17-22 сент. 2006 г. - Ставрополь, СевКавГТУ, 2006. - С. 284-286.
6. Кузнецова, А.Н. Анализ энергетического спектра носителей заряда в гетероструктурах с InGaAs/GaAs квантовыми ямами и InAs/GaAs квантовыми точками по данным емкостной спектроскопии и спектроскопии полной проводимости / Кузнецова А.Н., Шулгунова И.С. // Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V: труды девятой междунар. конф. Томск, 3-5 октября 2006. - Томск, 2006 г. - С. - 349-353.
7. Кузнецова, А.Н. Характеризация квантоворазмерных структур наноэлектроники неразрушающими методами адмиттанса / Кузнецова А.Н., Кучерова О.В., Зубков В.И., Соломонов А.В. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2008. № 2. С. 7-13.
8. Кузнецова, А.Н. Комплексное исследование и моделирование квантовых ям методами адмиттанса / Кузнецова А.Н., Зубков В.И. // Высокие технологии в промышленности России: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., г.Москва, 11-13 сент. 2008 г.- Москва, ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2008. - С. 320-325.