

На правах рукописи

СЕМИНА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЭЛЕКТРОН-ДЫРОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В КВАНТОВЫХ
ЯМАХ И В КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОКАХ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и в Учреждении Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, академик РАН Сурис Р. А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Кочерешко В. П.,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

доктор физико-математических наук, профессор Глинский Г. Ф.,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина).

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

Защита состоится "21" мая 2009 г. в 16³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.01 при Учреждении Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан "21" апреля 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Петров А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В качестве одной из наиболее актуальных и быстро развивающихся областей современной физики конденсированного состояния можно выделить физику полупроводниковых систем пониженной размерности (наноструктур) [1, 2, 3]. В таких структурах движение носителей заряда ограничено в одном или нескольких пространственных направлениях. Изучение оптических свойств наноструктур приобретает большую значимость, поскольку позволяет получать сведения об энергетическом спектре и элементарных возбуждениях изучаемого объекта. Уменьшение размерности системы приводит к значительным перестройкам энергетического спектра и к качественным изменениям оптических свойств, что, в свою очередь, влечет за собой появление новых физических эффектов.

В полупроводниковых низкоразмерных системах, благодаря пространственному ограничению движения носителей заряда, кулоновское взаимодействие между ними значительно усиливается и многочастичные комплексы, наблюдение которых в свободном состоянии в объемных материалах фактически невозможно, ярко проявляются в оптических спектрах наноструктур. Например, возможность существования трехчастичных комплексов - трионов, представляющих собой заряженные экситоны и состоящих из двух электронов и дырки (X^- -трион) или из двух дырок и одного электрона (X^+ -трион), была предсказана еще в 1958 году Лампертом [4]. Однако первые надежные экспериментальные наблюдения подобных комплексов были осуществлены в 1993 г. на структуре с квантовыми ямами на основе CdTe [5]. Качественное строение трионов показано на рис. 1. Схожими квантовомеханическими системами, состоящими из двух одинаковых частиц и третьей частицы, которая имеет другую массу и электрический заряд

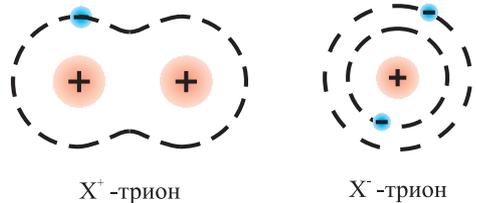


Рис. 1: Качественное строение трионов.

противоположного знака, являются ион водорода H^- (соответствует

X^- -триону) и молекулярный ион H_2^+ (соответствует X^+ -триону).

Реальные структуры неизбежно содержат различные дефекты, и изучение их влияния на спектр носителей заряда, на оптические и кинетические эффекты, вызывает большой интерес. Взаимодействие с дефектами может приводить к дополнительной локализации электрон-дырочных комплексов и тем самым значительно перестраивать их спектр и изменять структуру комплексов за счет дополнительного понижения размерности системы [6, 7, 8].

В общем случае задача о нахождении энергии связи электрон-дырочных комплексов в неидеальной полупроводниковой структуре аналитического решения не имеет, поэтому применяются различные численные методы. Часто используются вариационные методы с очень большим (порядка 1000) числом подгоночных параметров (см. например, [9]) либо расчеты из первых принципов [10]. С их помощью можно с весьма высокой точностью найти не только энергию комплекса, но и его волновую функцию. Однако большинство подобных методов отличается крайней громоздкостью, поэтому наибольшую эффективность они проявляют при расчете конкретных структур с фиксированными параметрами. Если же требуется проследить зависимость энергии комплекса от параметров структуры в широком диапазоне их значений и выделить качественные закономерности, то точность этих методов становится избыточной, а их реализация может быть затруднена в силу высоких требований к вычислительным средствам.

Следовательно, стоит острая необходимость в разработке универсальных методов, которые позволяли бы вычислять энергии связи электрон-дырочных комплексов, локализованных в плоскости квантовой ямы или вдоль оси квантовой проволоки, пусть и с меньшей точностью, но зато простым и наглядным способом, применимым в самом общем случае. Подобным требованиям отвечал бы вариационный подход с применением простых пробных функций с малым числом подгоночных параметров, которые при этом имели бы ясный физический смысл.

Цель настоящего исследования заключается в разработке эффективных и физически наглядных вариационных методов, использующих

пробные функции с минимально возможным числом подгоночных параметров, которые были бы пригодны для нахождения энергий связи и качественного описания структуры экситона, X^+ и X^- -трионов в различных полупроводниковых наноструктурах, в том числе в квантовой яме и квантовой проволоке с неоднородностью параметров.

Научная новизна полученных результатов:

1. Разработан новый универсальный метод построения вариационных волновых функций для двумерных электрон-дырочных комплексов, локализованных на потенциале притяжения произвольной формы. Предложены пробные функции с одним и четырьмя подгоночными параметрами, которые позволяют с хорошей точностью вычислить энергию связи комплекса при произвольных значениях параметров, характеризующих локализуемый потенциал.
2. Впервые получена зависимость энергий связи и качественного строения двумерных экситона, X^+ и X^- -трионов, локализованных на параболическом изотропном потенциале, в широком диапазоне изменения его параметров. Проведен анализ зависимости погрешности метода от формы латерального потенциала.
3. Предложены пробные функции всего с четырьмя подгоночными параметрами, позволяющие с хорошей точностью вычислить энергии связи основного и первого возбужденного состояний X^+ и X^- -трионов в полупроводниковых квантовых проволоках при произвольном отношении эффективных масс электрона и дырки и произвольном радиусе проволоки.
4. Метод построения пробных функций для двумерных локализованных электрон-дырочных комплексов обобщен на случай квантовых проволок с неоднородностью. Предложены пробные функции для нахождения энергии связи основного состояния экситона и X^+ и X^- -трионов в квантовой проволоке с неоднородностью. Впервые найдена зависимость энергии связи одномерных локализованных комплексов от параметров потенциала неоднородности.

Практическая значимость работы заключается в построении простых и физически наглядных моделей электрон-дырочных комплек-

сов. Это позволяет получить качественное и количественное представление об эволюции основного, а в некоторых случаях и первого возбужденного состояний трионов с изменением отношения масс, радиуса квантовой проволоки, а также параметров, характеризующих неоднородность системы. Разработанный подход позволяет строить пробные функции с малым числом подгоночных параметров, и следовательно, получить энергию связи простейших электрон-дырочных комплексов с хорошей (порядка 10 %) точностью и с меньшими, нежели распространенные методы [9, 10], затратами вычислительных ресурсов. Результаты, полученные в рамках представленных здесь исследований, делают возможным выполнить “экспресс”-оценку энергий связи электрон-дырочных комплексов при известных значениях параметров реальной гетероструктуры (квантовой ямы или квантовой проволоки), а также могут применяться для решения обратной задачи, связанной с оценкой параметров неоднородности системы (например, характерных размеров флуктуаций интерфейсов в квантовых ямах) по оптическим спектрам.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Предложен метод построения пробных функций, позволяющих найти энергию связи основного состояния электрон-дырочных комплексов, локализованных на неоднородностях интерфейсов квантовых ям и квантовых проволок. Указанные функции могут принимать формы, соответствующие предельным случаям, допускающим разделение переменных в соответствующем уравнении Шредингера, и плавно интерполируют между ними.
2. Дополнительная локализация в плоскости квантовой ямы в большей степени влияет на энергию связи X^- -триона по сравнению с X^+ -трионом. Энергия связи X^+ -триона монотонно зависит от степеней локализации носителей на неоднородностях интерфейсов квантовых ям, энергия связи X^- -триона может демонстрировать немонотонное поведение.
3. Структура экситона, X^+ и X^- -трионов в квазиодномерных структурах определяется, в основном, кулоновской частью эффективного потенциала взаимодействия между носителями. А значения

энергий связи электрон-дырочных комплексов в реалистичных квантовых проволоках имеют тот же порядок величины, что и в квантовых ямах.

4. Экситон и трионы локализуются на флуктуациях поперечного размера квантовых проволок при их реалистичных параметрах как единое целое.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на рабочих семинарах ФТИ РАН, заседании кафедры Физики твердого тела СПбГПУ, рабочем семинаре университета г. Клермон-Феррана (Франция), на международных конференциях “Nanostructures: Physics and Technology”(Санкт-Петербург, 2005; Новосибирск, 2007, стендовые доклады), “14th International Conference on Superlattices, Nano-Structures and Nano-Devices” (Стамбул, Турция, 2006, стендовый доклад), “17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems” (Генуя, Италия, 2007, стендовый доклад), “The 22nd General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society” (Рим, Италия, 2008, устный доклад), VII и VIII Российских конференциях по физике полупроводников (Москва, 2005; Екатеринбург, 2007, стендовые доклады), на Российско-швейцарском семинаре “Excitons and Exciton Condensates in Confined Semiconductor Systems” (Москва, 2006, стендовый доклад), международной школе “2nd International School on Nanophotonics” (Маратя, Италия, 2007, стендовый доклад), XII школе молодых ученых "Актуальные проблемы физики"(Звенигород, 2008, устный доклад).

Публикации. По результатам исследований, проведенных в диссертации опубликовано 7 печатных работ, список которых приведен в Заключении.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения и списка литературы. Она содержит 110 страниц текста, включая 17 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 112 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава “Электрон-дырочные комплексы, локализованные на неоднородностях интерфейсов квантовый ям” посвящена построению общего метода описания локализации электрон-дырочных комплексов на неоднородностях интерфейсов квантовых ям.

§1.1 представляет собой краткий обзор теоретических и экспериментальных исследований, посвященных изучению экситонов и трионов в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

В §1.2 формулируется используемая в диссертации модель неоднородности интерфейса квантовой ямы. Здесь показано, что при определенных условиях взаимодействие носителей заряда с неоднородностью сводится к действию одночастичных независимых потенциалов притяжения в плоскости квантовой ямы для электрона и дырки $U_e(\rho_e)$ и $U_h(\rho_h)$, где $\rho_{e,h}$ – латеральные координаты носителей. В этом параграфе формулируются основные используемые приближения.

§1.3 посвящен построению универсальной модели латеральной локализации двумерных электрон-дырочных комплексов. В §1.3.1 приведен гамильтониан электрон-дырочного комплекса в общем случае. Здесь выделены следующие параметры системы: E_c – типичная величина кулоновского взаимодействия между носителями; ΔE_e и ΔE_h – характерные расстояния между собственными уровнями невзаимодействующих электронов и дырок в потенциалах $U_e(\rho_e)$ и $U_h(\rho_h)$. Соотношения между этими параметрами

$$W_e = \frac{\Delta E_e}{E_c}, \quad W_h = \frac{\Delta E_h}{E_c} \quad (1)$$

определяют качественное строение комплекса. В подпараграфах §1.3.2 и §1.3.2 обсуждаются предельные случаи “слабой” ($W_{e,h} \ll 1$) и “сильной” ($W_e \gg 1$ или $W_h \gg 1$) неоднородности. При выполнении условий $W_{e,h} \ll 1$ потенциал неоднородности можно рассматривать как возму-

щение по отношению к кулоновскому взаимодействию между носителями заряда, а волновую функцию комплекса можно представить в виде произведения функций квантования его центра масс и относительного движения носителей, составляющих комплекс. При выполнении условия $W_e \gg 1$ или $W_h \gg 1$ можно разделить координаты электронной и дырочной подсистем комплекса.

В параграфе §1.4 построены пробные функции, и содержащие от 1 до 4 подгоночных параметров, общий вид которых не зависит от конкретной формы неоднородности. Указанные функции применимы при произвольных значениях параметров потенциала неоднородности. Пробная функция с четырьмя подгоночными параметрами имеет вид

$$\Psi = (\Psi^{C.M.})^{\alpha_R} (\Psi^{int})^{\alpha_\rho} (\Phi^e)^{\alpha_e} (\Phi^h)^{\alpha_h}, \quad (2)$$

где параметры α_e и α_h характеризуют независимое квантование подсистем электронов и дырок, а α_ρ и α_R – электрон-дырочный комплекс как целое. Здесь функции $\Psi^{C.M.}$, Ψ^{int} , Φ^e и Φ^h есть волновые функции центра масс электрон-дырочного комплекса, относительного движения носителей, электронной и дырочной подсистем соответственно. В общем случае перечисленные функции, но они не меняются при проведении вариационной процедуры и при заданных параметрах системы вычисляются лишь один раз. Они являются решениями независимых друг от друга уравнений Шредингера для систем с меньшим, чем исходная, числом частиц. Следовательно, вычисление функций $\Psi^{C.M.}$, Ψ^{int} , Φ^e и Φ^h является задачей принципиально меньшей сложности. В пятом параграфе обобщены основные результаты главы.

Вторая глава “Энергия связи экситона, X^+ и X^- -трионов, локализованных в плоскости квантовой ямы” посвящена применению разработанного в первой главе метода к частным случаям экситона и трионов, локализованных на флуктуациях интерфейсов квантовых ям.

В первом параграфе изучается двумерный экситон, локализованный на неоднородности параболической формы. В §2.1.1 приведен конкретный вид пробных функций экситона с одним и четырьмя подгоночными параметрами. В подпараграфе §2.1.2 приводятся результаты расчета энергии связи экситона в зависимости от параметров W_e и W_h . Эти за-

висимости представлены на рис. 2 автореферата (здесь и далее в качестве единиц измерения энергии и длины используются объемные экситонные Ридберг $Ry = \mu e^4 / 2\epsilon^2 \hbar^2$ и боровский радиус $a_B = \hbar^2 \epsilon / \mu e^2$). Из рисунка видно, что энергия связи экситона монотонно возрастает при увеличении любого из параметров W_e и W_h . Это объясняется ростом эффективности притяжения между электроном и дыркой с увеличением степеней локализации носителей в плоскости квантовой ямы. В §2.1.3 проиллюстрирован переход от предельного случая квантования экситона как единого целого к независимому квантованию электрона и дырки при изменении параметров неоднородности.

§2.1.4 посвящен сравнению результатов вариационного расчета с результатами точного расчета в частном случае $W_e = W_h$, когда модель параболического потенциала неоднородности допускает разделение координат центра масс экситона и относительного движения носителей [11]. Показано, что пробные функции с одним и четырьмя подгоночными параметрами позволяют вычислить энергию связи экситона с точностью около 20% и 2%, соответственно.

Второй параграф посвящен изучению влияния латеральной локализации на энергии связи двумерных X^+ и X^- -трионов. В §2.2.1 приведены гамильтонианы и пробные функции трионов для частного случая неоднородности параболической формы. В подпараграфе §2.2.2 приведены и обсуждаются результаты численного расчета, представленные на рис. 3. Из рисунка видно, что энергия связи X^- -триона может де-

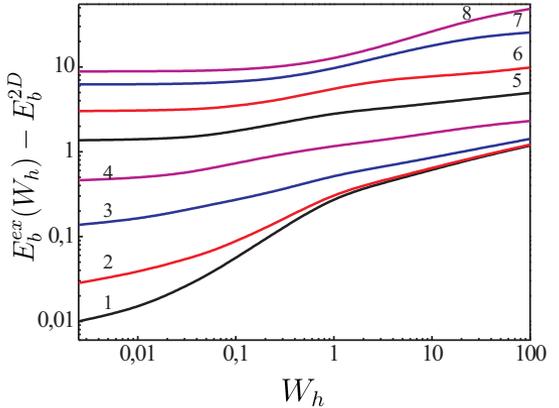


Рис. 2: Зависимости энергии связи экситона E_b от W_h , вычисленные для $\sigma = 0.3$ при помощи пробной функции с четырьмя подгоночными параметрами. Кривые 1-8 соответствуют: 1) $W_e = 2, 5 \cdot 10^{-3}$; 2) 10^{-2} ; 3) $6, 25 \cdot 10^{-2}$; 4) $0, 25$; 5) 1 ; 6) 4 ; 7) 25 ; 8) 10^2 .

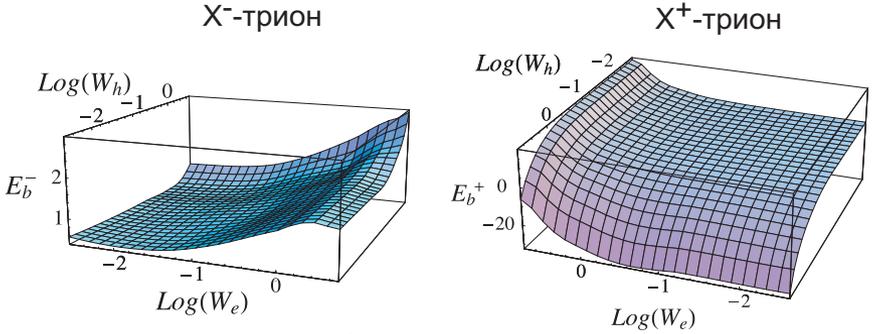


Рис. 3: Энергии связи X^- и X^+ -трионов как функции параметров потенциала неоднородности W_e и W_h , вычисленные для отношения масс $\sigma = 0,3$

монстрировать немонотонную зависимость от параметров неоднородности W_e и W_h . Это объясняется конкуренцией между обменным взаимодействием и кулоновским отталкиванием электронов. Энергия связи X^+ -триона монотонно зависит от параметров W_e и W_h из-за наличия в нем двух тяжелых частиц и меньшей роли обменных эффектов. В предельных случаях точность вычисления энергии связи трионов можно оценить примерно как 10% из сопоставления вариационного расчета с асимптотиками, полученными по теории возмущений. Показано, что при реалистичных параметрах системы ($W_e \approx 0,08$ и $W_h \approx 0,008$) можно достичь значительного (до 80%) увеличения энергии связи X^- -триона.

В §2.3 произведена оценка точности разработанного метода в случае локализации комплексов на потенциале неоднородности произвольной формы. Показано, что точность метода максимальна для одночастичных потенциалов, в которых расстояние между собственными энергетическими уровнями невзаимодействующих носителей быстро уменьшается с ростом номера уровня, например для $U_{e,h}(\rho_{e,h}) \propto (\rho_{e,h})^\gamma$, $\gamma < 2$. Напротив, для потенциалов, в которых расстояние между уровнями увеличивается с номером уровня ($\gamma < 2$), погрешность может быть выше. Для параболического потенциала погрешность метода имеет промежуточное значение. В §2.4 обобщаются основные результаты главы.

Третья глава “Энергия связи экситона и трионов в квазиодномер-

ных системах” посвящена изучению простейших электрон-дырочных комплексов в идеальных полупроводниковых квантовых проволоках. Параграф §3.1 представляет собой краткий обзор литературы по электрон-дырочным комплексам в квазиодномерных системах.

Во втором параграфе изучены особенности кулоновского взаимодействия в квазиодномерном случае. Продемонстрировано, что модель квантовой проволоки нулевого радиуса приводит к расходимостям в энергиях связи электрон-дырочных комплексов и поэтому не является адекватной. Кулоновское взаимодействие носителей заряда противоположных знаков описывается эффективным потенциалом [12]:

$$\widehat{V}_{eff}(z, a) = -2(z^2 + a^2)^{-1/2}, \quad (3)$$

где параметр a имеет смысл эффективного радиуса квантовой проволоки и учитывает конечность ее толщины. Для описания отталкивания между носителями одного знака используется потенциал, отличающийся от (3) лишь знаком. В §3.2 обоснован выбор такого вида эффективного потенциала. Показано, что его применение вместе с простейшей однопараметрической пробной функцией позволяет вычислить энергию связи экситона с точностью не ниже 5%. В качестве параметра, определяющего энергию связи электрон-дырочных комплексов выделен $\gamma = \ln(a_B/a)$. Показано, что известная логарифмическая асимптотика для энергии связи экситона $\propto \gamma^2$ применима только при больших значениях γ ($\gamma > 50$), не достижимых в полупроводниковых структурах.

В параграфе §3.3 изучается зависимость энергий связи трионов от радиуса квантовой проволоки и отношения масс электрона и дырки. В §3.3.1 для описания синглетного и триплетного состояний обоих типов трионов предложены пробные функции с четырьмя подгоночными параметрами. Зависимости энергий связи синглетного состояния X^+ и X^- -трионов от отношения масс электрона и дырки, вычисленные при разных радиусах квантовой проволоки показаны на рис. 4. Из рисунка видно, что энергия связи X^- -триона зависит от отношения масс крайне слабо, а энергия связи X^+ -триона, напротив, существенно зависит от отношения масс.

Это объясняется тем, что в X^+ -трионе присутствуют сразу две тяжелые частицы, увеличение массы которых сильнее сказывается на энергии относительно движения. В актуальном диапазоне значений $\gamma \gtrsim 1$ зависимость отношения энергии связи трионов к энергии связи экситона от γ может быть приближенно представлена линейной функцией с коэффициентами, зависящими от отношения масс носителей. Показано, что триплетное состояние X^+ -триона стабильно при произвольном отношении масс, а триплетное состояние X^- -триона стабильно при отношении масс большем 0,95. В подпараграфе §3.3.2 точность результатов, полученных вариационным методом, оценена путем сопоставления результатов вариационного расчета и прямой численной диагонализации гамильтониана. Точность вычисления энергий связи синглетного и триплетного состояний оказалась не ниже 10% и 5% соответственно.

В четвертом параграфе в пределе малых значений отношения масс электрона и дырки структура возбужденных состояний X^+ -триона проанализирована в рамках адиабатического приближения. В этом приближении состояния триона могут быть классифицированы как состояния тяжелых частиц (дырок) в эффективном поле легкой (электрона). Последнее определяется как функция координат дырок путем решения уравнения Шредингера для электрона в предположении, что координаты дырок заданы. Исследованы семейства состояний, соответствующие основному и первому возбужденному состоянию электрона в потенциале дырок. Последние обладают значительно меньшей энергией свя-

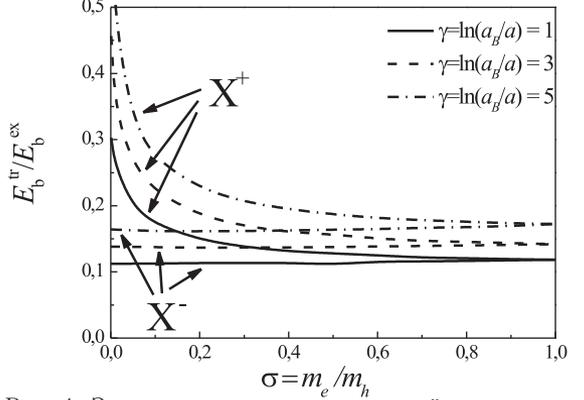


Рис. 4: Зависимости отношения энергии связи синглетного состояния X^+ и X^- -трионов к энергии связи экситона от отношения эффективных масс носителей, вычисленные для нескольких значений параметра γ .

зи и их энергия связи убывает быстрее с ростом отношения масс. Из сопоставления с точными результатами показано, что адиабатическое приближение применимо при отношении масс, не превышающем 0,2. В пятом параграфе обобщены главные результаты главы.

В четвертой главе “Энергия связи экситона и трионов в квантовой проволоке с неоднородностью” вариационным методом исследованы строение и энергии связи экситона и трионов, локализованных вдоль оси квантовой проволоки на флуктуации ее поперечного размера.

В первом параграфе разработанный в первой главе метод построения пробных функций обобщается для квазиодномерных структур. В §4.1.2 предложены пробные функции, вид которых аналогичен (2), для вычисления энергий связи электрон-дырочных комплексов, локализованных вдоль оси квантовой проволоки на неоднородности структуры, описываемой независимыми одночастичными потенциалами притяжения для электронов и дырок. В §4.1.3 обоснован выбор модели параболического потенциала неоднородности. Установлена область значений параметров W_e и W_h , в которой разработанный метод применим.

В §4.2 изучается зависимость энергии связи экситона от параметров потенциалов неоднородности W_e и W_h . Аналогично двумерному случаю, рассмотренному в параграфе §2.2, энергия связи экситона монотонно возрастает с ростом любого из параметров W_e и W_h .

В третьем параграфе точность вычисления энергии связи экситона при помощи пробной функции с четырьмя подгоночными параметрами оценивается путем сопоставления результатов вариационного расчета с результатами численной диагонализации матрицы гамильтониана экситона. Показано, что погрешность вариационного расчета не превышает 2% для произвольных значений параметров, характеризующих потенциал неоднородности.

В §4.4 изучаются трионы, локализованные вдоль оси квантовой проволоки. В §4.4.1 составляются пробные функции для X^+ и X^- -трионов. В §4.4.2 представлены результаты вариационного расчета. Зависимости энергий связи X^+ и X^- -трионов от параметров W_e и W_h показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что энергии связи трионов зависят от парамет-

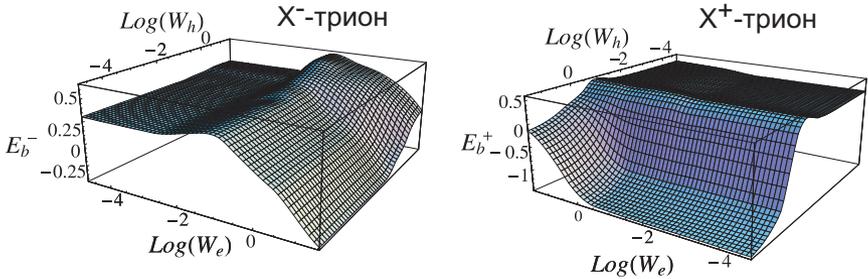


Рис. 5: Энергии связи X^- и X^+ -трионов как функции параметров потенциала неоднородности квантовой проволоки W_e и W_h , вычисленная для отношения масс $\sigma = 0, 1$ и параметра, характеризующего радиус квантовой проволоки $\gamma = 1$.

ров неоднородности немонотонным образом. Это объясняется тем, что при увеличении мощности потенциала, действующего на идентичные частицы сначала происходит рост энергии связи триона вследствие увеличения эффективности обменного взаимодействия, а при дальнейшем увеличении потенциала начинает преобладать кулоновское отталкивание и энергия связи уменьшается. Показано, что значительная часть актуальной области значений параметров W_e и W_h относится к предельному случаю “слабой” неоднородности. Точность результатов вариационного расчета энергий связи трионов оценивается примерно как 10% из сопоставления с асимптотиками в предельных случаях. При реалистичных значениях параметров системы ($W_e = 0, 22$; $W_h = 0, 075$) можно достичь значительного увеличения энергий связи X^- (до 100%) и X^+ -трионов (до 40%) за счет локализации. В пятом параграфе перечислены основные результаты главы.

В **Заключении** обобщены основные результаты работы:

1. Показано, что энергия связи простейших электрон-дырочных комплексов (экситона, X^+ и X^- -трионов), локализованных на неоднородностях интерфейсов квантовых ям и квантовых проволок, может быть вычислена с хорошей точностью при помощи пробных функций с небольшим числом подгоночных параметров. Применение подобных пробных функций делает возможным проследить зависимость энергии связи комплексов в широком диапазоне параметров системы.

2. Выделены параметры, соотношения между которыми определяют

качественное строение электрон-дырочного комплекса, локализованного на неоднородности интерфейса квантовой ямы или квантовой проволоки. Установлены предельные соотношения между выделенными параметрами, при выполнении которых структура комплекса и вид его волновой функции становятся известными из физических соображений.

3. На примере экситона, локализованного в плоскости квантовой ямы, продемонстрирован переход между предельными случаями качественно-различного строения электрон-дырочных комплексов при изменении параметров неоднородности структуры.

4. Продемонстрирована хорошая точность разработанного метода на примере одномерных и двумерных экситона, X^+ и X^- -трионов, локализованных на неоднородности структуры, описываемой потенциалом параболической формы. При использовании пробной функции с четырьмя подгоночными параметрами погрешность вычисления энергий связи экситона составляет около 5%, трионов – 10%. Получены зависимости энергий связи экситона, X^+ и X^- -трионов от параметров неоднородности в широком диапазоне их значений.

5. Показано, что точность разработанного метода максимальна для локализуемых потенциалов, в которых расстояние между собственными энергетическими уровнями невзаимодействующих носителей быстро уменьшается с увеличением энергии. Для потенциалов, в которых расстояние между уровнями носителей увеличивается с номером уровня, погрешность может быть выше. Параболический потенциал демонстрирует промежуточную величину погрешности.

6. Продемонстрировано, что наблюдающееся в экспериментах увеличение энергии связи трионов в узких квантовых ямах и квантовых проволоках малого радиуса может быть объяснено их локализацией на неоднородностях структуры. Показано, что при реалистичных параметрах неоднородности можно достичь значительного увеличения энергии связи X^- -триона за счет локализации, как в квантовой яме (до 80%), так и в квантовой проволоке (до 100%). Для X^+ -триона увеличения энергии связи составляют приблизительно 15% и 40% соответственно.

7. Показано, что в качестве параметра, определяющего энергию свя-

зи электрон-дырочного комплекса в идеальной квантовой проволоке можно выделить следующий: $\gamma = \ln(a_B/a)$, где a – эффективный радиус квантовой проволоки, а a_B – боровский радиус. Показано, что логарифмическая асимптотика для энергии связи экситона $\propto \gamma^2$ применима только при нереалистично больших значениях γ ($\gamma > 50$).

8. Составлены пробные функции с четырьмя подгоночными параметрами для нахождения энергий связи синглетного и триплетного состояний X^+ и X^- -трионов в идеальной квантовой проволоке. Применимость предложенного метода проконтролирована путем численной диагонализации гамильтонианов экситона и трионов при фиксированных параметрах. Погрешность расчета составила: не более 10% для нахождения энергии связи синглетного состояния и не более 2% для триплетного при $\gamma = 1$, что соответствует радиусу квантовой проволоки на основе GaAs равному приблизительно 40 Å.

9. Показано, что в области $\gamma \gtrsim 1$, соответствующей реальным полупроводниковым структурам, зависимость отношения энергий связи триона и экситона от γ может быть аппроксимирована линейной функцией, с коэффициентами, зависящими от отношения масс носителей.

10. В пределе малого отношения масс электрона и дырки в адиабатическом приближении исследована структура возбужденных состояний X^+ -триона, локализованного в идеальной квантовой проволоке. Изучены семейства состояний, соответствующие основному и первому возбужденному состоянию электрона в потенциале дырок. Показано, что последние обладают значительно меньшей энергией связи и их энергия связи убывает быстрее с ростом отношения масс. Путем сопоставления с точными результатами показано, что адиабатическое приближение применимо при $m_e/m_h < 0,2$.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

1. M.A. Semina, R.A. Sergeev, R.A. Suris, Excitons localized on quantum well interface roughnesses // Proc. Int. Symp. "Nanostructures Physics and Technology"(St.-Petersburg, Russia, 2005), pp. 358-360.

2. М.А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Локализация электронно-дырочных комплексов на флуктуациях интерфейса квантовых ям.// ФТП, **40**(11), 1373-1380 (2006).
3. M.A. Semina, R.A. Sergeev and R.A. Suris, Electron-hole complexes localized on the quantum well interface roughnesses// Phys. Stat. Sol. (c) **4**, No.2, 363-365 (2006).
4. M.A. Semina, R.A. Sergeev and R.A. Suris, Binding energies of 2D laterally-confined trions// Proc. Int. Symp. "Nanostructures Physics and Technology"(St.-Petersburg, Russia, 2007), pp. 7-9.
5. M.A. Semina, R.A. Sergeev and R.A. Suris, Binding energies of 2D laterally-confined trions// Physica E **40**, 5, 1357-1359 (2008).
6. М.А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Энергия связи экситона и X^+ , X^- -трионов в одномерных системах // ФТП, **42**(12), 1459-1465 (2008).
7. М.А. Семина, Р.А. Сергеев, Р.А. Сурис, Энергия связи экситона и X^+ , X^- -трионов в одномерных системах// Тезисы XII Школы молодых ученых “Актуальные проблемы физики” и II Школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований” (Звенигород, 23-26 ноября 2008), pp 43-44.

Список литературы

- [1] *Davies J.* The physics of low-dimensional semiconductors. — Cambridge University Press, 1998.
- [2] *Ivchenko E. L.* Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures. — Alpha Science, Harrow UK, 2005.
- [3] *Глинский Г. Ф.* Полупроводники и полупроводниковые наноструктуры: симметрия и электронные состояния. — Издательство “Технолит”, Санкт-Петербург, 2008.

- [4] *Lampert M. A.* Mobile and immobile effective-mass-particle complexes in nonmetallic solids // *Phys. Rev. Lett.* — 1958. — Vol. 1, no. 12. — Pp. 450–453.
- [5] Observation of negatively charged excitons X^- in semiconductor quantum wells / K. Kheng, R. T. Cox, M. Y. d' Aubigné et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 1993. — Vol. 71, no. 11. — Pp. 1752–1755.
- [6] Low-temperature exciton trapping on interface defects in semiconductor quantum wells / G. Bastard, C. Delalande, M. H. Meynadier et al. // *Phys. Rev. B.* — 1984. — Vol. 29, no. 12. — Pp. 7042–7044.
- [7] Enhancement of the binding energy of charged excitons in disordered quantum wires / T. Otterburg, D. Y. Oberli, M.-A. Dupertuis et al. // *Phys. Rev. B.* — 2005. — Vol. 71, no. 3. — P. 033301.
- [8] Тонкая структура А-линии связанного экситона в твердом растворе $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$: N / Г. Ф. Глинский, М. В. Лупал, И. И. Парфенова, А. Н. Пихтин // *ФТП.* — 1992. — Vol. 26. — Pp. 644–651.
- [9] Binding energy of charged excitons bound to interface defects of semiconductor quantum wells / L. C. O. Dacal, R. Ferreira, G. Bastard, J. A. Brum // *Phys. Rev. B.* — 2002. — Vol. 65, no. 11. — P. 115325.
- [10] Influence of well-width fluctuations on the binding energy of excitons, charged excitons, and biexcitons in GaAs -based quantum wells / A. V. Filinov, C. Riva, F. M. Peeters et al. // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 70, no. 3. — P. 035323.
- [11] *Que W.* Excitons in quantum dots with parabolic confinement // *Phys. Rev. B.* — 1992. — Vol. 45. — P. 11036.
- [12] *Egger R., Grabert H.* Charging effects in quantum wires // *Phys. Rev. B.* — 1997. — Vol. 55, no. 15. — Pp. 9929–9934.