

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Головатенко Александра Анатольевича
«Энергетическая структура и магнитооптические свойства экситонных
комплексов в полупроводниковых квантовых точках A2B6»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 — «физика полупроводников»

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям оптических и электронных свойств полупроводниковых структур пониженной размерности, являющихся перспективными кандидатами для использования в области медицины, лазерной физики и полупроводниковой наноэлектронике.

Диссертационная работа А.А. Головатенко посвящена теоретическому анализу состояний одиночных носителей заряда и экситонных комплексов в полупроводниковых квантовых точках и наноплателетах A2B6. В работе выполнено последовательное теоретическое исследование оптических и магнитооптических свойств квантовых точек и наноплателетов CdSe и CdTe. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения возможности практического применения полученных результатов. Достоверность результатов обусловлена тщательно выполненными расчетами электронных и оптических свойств исследуемых наноструктур, подробным и аккуратным сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными, а также многократной апробацией результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 145 страниц, включая 39 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 140 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимы на защиту положения, приведено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе с помощью вариационного метода выполнен расчет двух нижних уровней размерного квантования для электрона и дырки в сферически симметричных потенциалах плавного вида. При выполнении расчета учтена сложная структура валентной зоны Γ_8 . В качестве плавных модельных потенциалов выбраны потенциал гармонического осциллятора и потенциал с конечной высотой барьера. Проведено сопоставление результатов, выполненных вариационным методом, с данными, полученными в рамках численного расчета. Показано, что относительное положение уровней энергии дырочных состояний

зависит различным образом от отношения масс легкой и тяжелой дырки в потенциалах плавного и резкого типа. Продемонстрировано, что в отличие от расщепления, обусловленного встроенным кристаллическим полем, знак расщепления состояний дырки с различными проекциями углового момента, связанного с анизотропией локализуемого потенциала, сильно зависит от вида потенциала. Обнаружено, что для материалов со структурой цинковой обманки g -фактор резидентной дырки, локализованной в сферически симметричном потенциале, слабо зависит от конкретного вида потенциала.

Во второй главе проведен расчет энергии связи экситона и биэкситона, локализованных в потенциале бесконечно глубокой прямоугольной квантовой ямы и в потенциалах плавного типа. Для экситона в режиме сильного размерного квантования получен диапазон значений отношения масс электрона и дырки, в границах которого необходимо учитывать наличие корреляций между носителями заряда. Для биэкситонов предложен вид двухчастичных волновых функций электронов и дырок, используемых в вариационном подходе, который позволяет учесть влияние корреляционных эффектов между одноименно заряженными частицами в биэкситоне. Предложенный подход позволил получить типичную величину связи биэкситона, по порядку величины совпадающую с результатами опубликованных ранее работ.

В третьей главе выполнено исследование тонкой энергетической структуры экситона в сферических коллоидных квантовых точках CdSe со структурой цинковой обманки и вюрцита. Также проведен анализ тонкой энергетической структуры экситона в коллоидных наноплателетах CdSe различной толщины. Для коллоидных квантовых точек выполнено моделирование экспериментальных спектров для ансамблей коллоидных квантовых точек CdSe различной кристаллической модификации и различных размеров, полученных методами спектроскопии возбуждения фотолюминесценции и спектроскопии сужения линии фотолюминесценции. Из похожего вида размерной зависимости энергетического расщепления между нижними состояниями тонкой энергетической структуры экситона $1S_e1S_{3/2}$ для квантовых точек обеих кристаллических модификаций сделан вывод о наличии аксиальной анизотропии в квантовых точках со структурой цинковой обманки. Для объяснения полученных результатов предположено, что источником аксиальной анизотропии могут выступать несферичность формы квантовых точек или наличие заряженных состояний на поверхности. При исследовании расщепления нижних состояний тонкой энергетической структуры экситона в коллоидных наноплателетах CdSe различной толщины со структурой цинковой обманки показано, что расщепление обратно пропорционально толщине наноплателетов.

В четвертой главе исследована магнитная циркулярная поляризация фотолюминесценции в коллоидных наноплателетах CdSe. Проанализировано влияние обменного поля поверхностных парамагнитных центров и внешнего магнитного поля на активацию излучательной рекомбинации, а также на величину и знак степени циркулярной поляризации фотолюминесценции темного экситона в коллоидных наноплателетах. Обнаружено, что поляризация поверхностных спинов во внешнем магнитном поле создает дополнительный обменный вклад в зеемановское расщепление экситона, что приводит к наличию спин-зависимой излучательной рекомбинации. Также продемонстрировано, что в коллоидных наноплателетах CdSe/CdS сигнал фотолюминесценции определяется рекомбинацией отрицательно заряженных трионов.

В пятой главе показано, что диполь-дипольный перенос энергии в ансамбле коллоидных квантовых точек CdTe при низких температурах происходит из состояния темного экситона. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на эффективность диполь-дипольного переноса энергии и на темпы излучательной рекомбинации и диполь-дипольного переноса энергии с участием темного экситона.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Предложен вид двухчастичных пробных волновых функций для электронной и дырочной подсистем, позволивших провести учет корреляций между одноименно заряженными частицами в биэкситоне, что дало возможность повысить точность расчета энергии связи биэкситона.

2. Обнаружено, что расщепление нижних состояний тонкой энергетической структуры экситона в коллоидных наноплателетах CdSe со структурой цинковой обманки обратно пропорционально толщине наноплателетов. Установленный вид зависимости является следствием наличия короткодействующего обменного взаимодействия электрона и дырки в условиях диэлектрического конфайнмента.

3. Проанализированы механизмы активации излучательной рекомбинации темного экситона в коллоидных наноплателетах в обменном поле поверхностных парамагнитных центров и во внешнем магнитном поле.

4. Установлено, что темный экситон вносит определяющий вклад в диполь-дипольный перенос возбуждения между квантовыми точками CdTe.

К достоинствам работы также следует отнести подробное сравнение результатов теоретического анализа, полученных автором на основе предложенных теоретических подходов для описания энергетической структуры и магнитооптических свойств экситонных комплексов в полупроводниковых наноструктурах A_2B_6 , с данными экспериментальных исследований, выполненных как российскими, так и международными научными группами.

В качестве замечаний по диссертационной работе А.А. Головатенко можно отметить следующее:

1. Во второй главе при вычислении энергии связи экситона автор пренебрегает вкладами, обусловленными диэлектрическим контрастом, ссылаясь на малость разницы диэлектрической проницаемости материала квантовой точки и полупроводниковой матрицы. С целью обобщения результатов и расширения области применения предлагаемого метода представляется важным провести учет диэлектрического контраста и оценить величину вклада, им обусловленную.

2. В четвертой главе исследован вопрос об активации излучательной рекомбинации темного экситона за счет обменного взаимодействия с поверхностными парамагнитными центрами, возникающими из-за неполной пассивации оборванных связей. Представляется важным оценить число оборванных связей на поверхности и степень их заполнения. Возможен ли в рассматриваемой системе процесс распада экситона с последующим туннельным уходом носителей заряда на поверхностные незаполненные оборванные связи? Каким образом такой процесс скажется на полученных в данной главе результатах?

3. В пятой главе исследован вопрос о диполь-дипольном переносе возбуждения с участием темного экситона в ансамбле коллоидных квантовых точек $CdTe$. Для наблюдения рассматриваемого эффекта необходима высокая концентрация квантовых точек в ансамбле, что может приводит к возникновению туннельных процессов в рассматриваемой системе. Представляется важным обсудить вопрос влияния туннельных эффектов на характеристики исследуемой системы.

4. На рисунке 1.9 в первой главе диссертационной работы отсутствует сплошная черная кривая, обсуждаемая в тексте работы.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся законченным и оригинальным научным исследованием. Полученные результаты являются актуальными, новыми и представляют значительный научный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Актуальность, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и достоверность

полученных в работе результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК РФ. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен понятно и логически последовательно. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа А. А. Головатенко «Энергетическая структура и магнитооптические свойства экситонных комплексов в полупроводниковых квантовых точках А2В6» соответствует всем требованиям, предъявляемым Положением ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник физического факультета
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор,
доктор физико-математических наук

Н.Н. Сысоев

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2
Тел.: 8 (495) 939-50-72
эл. почта: vmantsev@gmail.com