

«УТВЕРЖДАЮ»

**Проректор по научной работе
СПбГУ**

С. В. Аплонов

« _____ » _____ 2018

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

- федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования

«Санкт-Петербургский Государственный Университет»

на диссертационную работу

ГОЛОВАТЕНКО АЛЕКСАНДРА АНАТОЛЬЕВИЧА

«Энергетическая структура и магнитооптические свойства

экситонных комплексов в полупроводниковых квантовых точках A_2B_6 »,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Диссертационная работа А.А.Головатенко посвящена теоретическому исследованию свойств одиночных носителей заряда и экситонных комплексов в квантовых точках из полупроводниковых соединений A_2B_6 . Интерес к данной области физики полупроводников сегодня обусловлен, во-первых, появлением новых видов коллоидных наноструктур с квантовыми точками, а во-вторых, перспективностью создания на основе квантовых точек A_2B_6 излучателей одиночных и запутанных фотонов, что подтверждает несомненную **актуальность** диссертационной работы А.А.Головатенко для науки и практических приложений.

Диссертация А.А.Головатенко имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК, и состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержание диссертационной работы изложено на 145 страницах, включая

39 рисунков, 3 таблицы и список из 140 библиографических ссылок на оригинальные работы других авторов.

В тексте диссертации обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов работы, даны сведения об апробации работы.

При проведении теоретического анализа состояний одиночных носителей заряда в сфероидальных квантовых точках с градиентным изменением состава с учетом сложной структуры валентной зоны Γ_8 А.А.Головатенко выбрал вид пробных волновых функций, позволяющий точно описать энергии двух первых уровней размерного квантования, а также расщеплений состояний с различной величиной полного углового момента, вызванных кристаллическим полем и одноосной анизотропией. Следует отметить, что наблюдается исключительно хорошее совпадение вариационного расчета с контрольным численным расчетом, как для энергий квантования, так и для расщеплений, полученных по теории возмущений первого порядка.

Далее А.А.Головатенко провел теоретический анализ влияния типа сферически симметричного локализующего потенциала на энергию связи экситонных комплексов. Использованный автором метод учета корреляций между состояниями электронов и дырок позволил получить расчетные энергии связи, сопоставимые со значениями, которые были получены с использованием иных методов расчета, что подтверждает достоверность полученных результатов. На основании вышеприведенных теоретических результатов проведен анализ спектра плотности экситонных состояний в ансамбле квантовых точек CdZnSe, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

При моделировании тонкой энергетической структуры в квантовых точках CdSe с симметрией типа цинковой обманки учтено, что ранее тонкая энергетическая структура изучалась в основном для наноструктур CdSe со структурой вюрцита, которую отличает наличие встроенного кристаллического поля. Показано, что расщепление нижних состояний тонкой структуры в сферических квантовых точках CdSe со структурой цинковой обманки проявляет схожую зависимость от размера квантовой

точки, как и в случае CdSe со структурой вюрцита. На этом основании сделан вывод о наличии фактора, нарушающего сферическую симметрию квантовой точки, во всем диапазоне исследованных размеров. Моделирование тонкой структуры в случае коллоидных квантовых ям (наноплателетов) CdSe различной толщины показало, что величина расщепления нижних состояний тонкой энергетической структуры возрастает обратно пропорционально толщине квантовой ямы.

На основании моделирования степени магнитной циркулярной поляризации фотолюминесценции показано бимодальное распределение оси анизотропии коллоидных квантовых ям в ансамбле коллоидных квантовых ям CdSe с оболочкой CdS. Проведен теоретический анализ влияния обменного взаимодействия дипольно-запрещенного экситона с поверхностными оборванными связями в коллоидных квантовых ямах CdSe. Показано, что в зависимости от знака константы обменного взаимодействия и соотношения спин-зависимого и спин-независимого темпов излучательной рекомбинации экситона, степень циркулярной поляризации фотолюминесценции может менять знак и иметь немонотонную зависимость от напряженности магнитного поля.

Проведенное на основании решения кинетических уравнений моделирование процессов спектральной диффузии в ансамбле коллоидных квантовых точек CdTe продемонстрировало участие дипольно-запрещенного экситонного состояния в диполь-дипольном процессе переноса возбуждения между квантовыми точками различного размера, вызванное подмешиванием дипольно-разрешенного состояния в присутствие поперечного магнитного поля.

Достоверность результатов, полученных в диссертации А.А.Головатенко, подтверждается сопоставлением с контрольным численным расчетом, с ранее опубликованными результатами других исследователей, хорошим согласованием результатов моделирования с известными экспериментальными результатами.

Научная и практическая значимость диссертации А.А.Головатенко обусловлена тем, что в ней теоретически рассмотрено влияние типа кристаллической структуры и вида потенциала на свойства экситонных комплексов в квантовых точках из материалов A_2B_6 . Проанализирован ряд

явлений, связанных с активацией диполь-запрещенного экситона, определяющего излучательные свойства коллоидных квантовых точек при низких температурах.

Результаты работы можно рекомендовать для использования в научных и учебных организациях, в которых ведутся исследования по сходной тематике: в Санкт-Петербургском Государственном Университете, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Физическом институте РАН им. П.Н. Лебедева, Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова, а также в других вузах и научно-исследовательских институтах.

По диссертации имеются следующие замечания и вопросы:

1. Энергетический спектр носителей и экситонных комплексов в квантовых точках должен зависеть от деформаций и напряжений, возникающих на границе квантовой точки и барьера вследствие, например, разных постоянных решетки. В связи с этим интересно было бы оценить изменение энергии носителей из-за влияния деформаций и напряжений и обосновать правомерность пренебречь их влиянием, т.к. в диссертации вклады от этих факторов не рассматриваются.
2. Рассматриваемые потенциалы плавного вида предполагают рассмотрение движения носителей заряда во всей области пространства вплоть до бесконечности. Как это согласуется с тем фактом, что область движения носителей заряда в сферической квантовой точке, пусть даже с плавно меняющимся потенциалом внутри квантовой точки, всегда будет ограничен сферой с радиусом R ?
3. В разделе 1.2 обсуждаются четыре радиальные компоненты волновой функции дырки в сферически симметричной квантовой точке: две радиальные функции, отвечающих орбитальному моменту $l=0$ и $l=2$, а также две функции, отвечающих орбитальному моменту $l=1$ и $l=3$ и приводятся уравнения для этих функций. В диссертации эти функции названы "одночастичными состояниями s - и p -симметрии". Это вызывает некоторое замешательство, т.к. состояния с $l=2$ и $l=3$ не имеют симметрии s - и p - состояний. Правильнее было бы называть данные четыре радиальные функции в стиле, общепринятом в квантовой механике (Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц "Том 3. Квантовая механика"): для $l=0$ -- функция симметрии s -состояния; для $l=1$ --

функция симметрии p-состояния; для $l=2$ -- функция симметрии d-состояния; для $l=3$ -- функция симметрии f-состояния.

4. В диссертации (Глава 2) энергия связи биэкситона определяется как разница двух энергий экситона и энергии биэкситона. Тем не менее, кроме канала развала биэкситона на два экситона, существует канал развала биэкситона на трион и носитель заряда. Поэтому было бы полезно вычислить энергии соответствующих трионов и проверить, что используемое определение действительно является энергией связи биэкситона, т.е. минимальной энергией, необходимой для его развала.
5. Когда речь идет о поверхностных оборванных связях, приводящих к возникновению дополнительного эффективного магнитного поля, то существуют ли прямые экспериментальные доказательства, подтверждающие наличие таких поверхностных состояний в рассматриваемых объектах?
6. В работе рассмотрены свойства квантовых точек разных типов, причем основное внимание уделено коллоидным квантовым точкам. В то же время представляется очень интересным и полезным более четкое выделение из результатов работы тех, которые могут быть отнесены и к другим типам квантовых точек.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Основные положения диссертации А.А.Головатенко, выносимые на защиту, обладают безусловной научной новизной, а сама работа выполнена на высоком научном уровне. Её результаты полностью и своевременно опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа «Энергетическая структура и магнитооптические свойства экситонных комплексов в полупроводниковых квантовых точках A_2B_6 » является завершенным научным исследованием, соответствует профилю Совета Д 002.205.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников), полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой

степени кандидата наук, в том числе требованиям пунктов 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации Александр Анатольевич Головатенко, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Диссертационная работа А.А.Головатенко заслушана и обсуждена на совместном научном семинаре кафедры «Физика твердого тела» физического факультета и лаборатории «Оптика спина» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 23.10.2018.

Адрес организации:

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург,

Университетская наб., д. 7/9

Тел.: 324-12-58

Эл. почта: s.aplonov@spbu.ru

Веб-сайт: <http://spbu.ru/>

Заведующий кафедрой физики

твердого тела СПбГУ, доктор физ.-мат. наук

Тел.: 428-45-46

Эл. почта: s.verbin@spbu.ru

Вербин

Сергей Юрьевич

Профессор кафедры физики

твердого тела СПбГУ, доктор физ.-мат. наук

Тел.: 428-45-45

Эл. почта: v.agekyan@spbu.ru

Агемян

Вадим Фадеевич