

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Айрапетяна Давида Борисевича** по теме: **“Исследование электродинамических и оптических характеристик нульмерных квантовых структур”**,
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
У. 04. 10 “Физика полупроводников”

В последние десятилетия физика квантовых структур превратилась в наиболее динамично развивающуюся область научных и прикладных исследований, которая непременно расширяется и углубляется с открытием новых физических явлений. Новейшие технологические возможности синтеза и обработки мезоскопических наномасштабных систем, а также накопленный фундаментальный научный потенциал в итоге обусловили появление научно-технической области «Нанотехнология», как взаимосвязанного результата квантово-механического проектирования и материаловедения. Ныне нанoeлектронные устройства на основе существующих полупроводниковых квантовых структур уже играют определяющую роль в лазерных технологиях, квантовой оптике, солнечной энергетике, биомедицине и многих других ведущих технологических областях.

В настоящем внимание исследователей в основном сосредоточено на создании новых квантовых структур с более совершенными и управляемыми характеристиками. Оно позволяет существенно увеличить объем памяти, быстродействие и надежность устройств на их основе, а также повысить эффективность передачи и преобразования энергии. Создание таких систем, которыми можно управлять с наномасштабной точностью по размеру, внутренней структуре, а также составу, обусловлено указанными столь комплексными целями. Изучение физических характеристик последних принято считать одним из важнейших направлений научных исследований современного периода.

В итоге реальные возможности технологии синтеза мезоскопических наносистем, а также научный потенциал исследований по квантовым структурам привели также к созданию уникального научно-технического направления в этой области, а именно квантово-механической инженерии. Этим обусловлено появление своеобразных классов гетерогенных систем с заданными наперед физическими параметрами и свойствами, а в перспективе – пути к разработке приборов нанoeлектроники, основанных на качественно новых нанометрических эффектах.

Среди таковых вызывают всевозрастающий интерес наноструктуры на базе полупроводниковых квантовых точек (КТ). Здесь подбором вида и состава материалов КТ и окружающей среды, а также мезоскопических размеров и формы активной области, становится возможным в широких пределах менять положение как одночастичных, так и кулоновских уровней энергии различных квазичастиц и комплексов квазичастиц – осуществить наряду с уже ставшей привычной "зонной инженерией" также "инженерию кулоновского взаимодействия".

Представленная диссертационная работа посвящена изучению электронных, электродинамических и оптических свойств топологически разных по форме и размерам полупроводниковых нульмерных квантовых структур, а именно сферических, цилиндрических, вытянутых и сплюснутых сфероидальных, а также эллипсоидных КТ в условиях разных внешних факторов (электрических, магнитных и лазерных полей, гидростатического давления). В работе суммированы ряд важных результатов, касающихся фундаментальной физике полупроводниковых наноструктур, которые, благодаря современным полупроводниковым нанотехнологиям, могут приобрести также ценное прикладное значение.

Исходя из вышеизложенного можно с уверенностью считать, что вопросы, обсуждаемые в диссертации, являются **актуальными, продиктованы совокупными требованиями текущих фундаментальных и практических исследований.**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и списка цитируемой литературы из 334

наименований. Общий объём работы 267 страницы, включая 83 рисунков и 15 таблиц. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в виде научных статей и трудов – всего 59 публикаций.

Введение содержит обстоятельный обзор основных, наиболее близких к теме диссертационной работы теоретических и экспериментальных исследований, обоснована **актуальность** темы, сформулирована **цель, приведены основные положения выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы.**

Первая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию сферических и цилиндрических квантовых точек с различными моделями потенциала ограничения в различных режимах размерного квантования. Данная глава состоит из четырех разделов, где исследовано прямое межзонное поглощение света в ансамбле невзаимодействующих сферических и цилиндрических квантовых точек с модифицированным потенциалом Пёшля–Теллера и потенциалом Морса. Найдены правила отбора, соответствующие различным переходам между квантовыми уровнями. Учтено дисперсионное распределение квантовых точек по геометрическим размерам по трем экспериментально реализуемым симметричным и асимметричным функциям распределения. **Во второй главе** изучены электронные и оптические свойства сфероидальных и эллипсоидных КТ. Рассчитана вероятность прямых межзонных переходов и определены правила отбора для квантовых чисел. Рассмотрено влияние гидростатического давления и температуры на энергию основного состояния электрона и край поглощения сплюснутой сфероидальной КТ. Вариационным методом исследованы энергия связи и сила осциллятора водородоподобной донорной примеси в сильно сплюснутых и вытянутых эллипсоидных КТ. Показано нарушение цилиндрической симметрии распределения плотности вероятности при изменении положения примеси и восстановление симметрии в пределе приближения примеси к стенке КТ. **В третьей главе** изучены экситонные комплексы в эллипсоидных КТ, а именно вариационным методом рассчитаны экситонные, отрицательные, положительные трионы и биэкситонные состояния в сильно вытянутой эллипсоидальной КТ. Показано, что манипулирование геометрическими параметрами вытянутой КТ позволяет контролировать радиационное время жизни экситонных комплексов. Эта особенность важна для возможного применения экситонных и биэкситонных комплексов в качестве одно- и двухфотонных источников. Получено, что энергия биэкситона примерно равна удвоенному значению энергии экситона во всем интервале изменения малой полуоси КТ и в связи с чем рассмотрены соответствующие силы осцилляторов экситонных переходов, а именно для переходов биэкситон-экситон и экситон-основное состояние. При этом, энергетические уровни как экситонов, так и биэкситонов увеличиваются с увеличением значения интенсивности лазера и уменьшаются с увеличением малой полуоси. Оценены времена жизни излучательной рекомбинации экситонов и биэкситонов для различных значений полуосей и величин лазера. Наблюдалось влияние туннелирования на формирование эффекта Гальбота. Показано, что эффект туннелирования в сочетании с величиной видимости приводит к возникновению периодической структуры пробного поля. **Четвертая глава** посвящена реализации обобщенной теоремы Кона в эллипсоидальных КТ с непроницаемыми стенками. Показано, что удерживающий параболический потенциал зависит от геометрии эллипсоида, что позволяет совместно с магнитным полем управлять резонансными частотами переходов путем изменения геометрических размеров КТ. Показана возможность выявления одночастичных переходов в многочастичной системе для случая электронного газа, находящегося в сильно вытянутой эллипсоидной КТ, в присутствии однородного внешнего магнитного поля. В этом случае формирование параболического удерживающего потенциала электронного газа обусловлено специфической геометрией КТ. Для одного электронного состояния изучены дипольный и квадрупольный моменты и показано, что дипольный момент для рассматриваемой системы равен нулю. Выведена также аналитическая формула для квадрупольного момента. Параллельно с этим рассматривается проблема экситонных состояний в сферической квантовой точке ядро/оболочка/оболочка

с трехмерным удерживающим потенциалом Винтерница-Сморозинского. Построены пики поглощения, соответствующие квантовым переходам между уровнями энергии. При этом, пики, соответствующие диагональным переходам, проявляются с относительно высокой интенсивностью, тогда как пики недиагональных переходов имеют ненулевую интенсивность. **В пятой главе** теоретически исследованы линейные и нелинейные внутризонные оптические свойства коллоидных сферических КТ ядро/оболочка CdSe/CdS в присутствии донорной примеси в центре. Рассчитана энергия связи электрона как функции полуширины сферической ядро/оболочки КТ и показано, что зависимость монотонна. Получены спектры линейного, нелинейного и полного коэффициентов поглощения энергии падающего света для различных значений полуширины. Показано, что в КТ меньшего размера поглощение света происходит с большей энергией, чем в КТ большего размера, а нелинейная поправка больше для КТ большего радиуса, в связи с чем интенсивность полного коэффициента поглощения будет больше для КТ меньшего размера. Рассматривается изменение показателя преломления в зависимости от энергии падающего света. При расчетах генераций второй и третьей гармоник показано, что по мере увеличения радиуса КТ генерация увеличивается, при котором указано возможность появления эффекта красного смещения. **В шестой главе** исследованы электронные состояния и оптические свойства конических КТ из GaAs. Получена аналитическая зависимость энергетических уровней от геометрических параметров конической КТ с помощью адиабатического приближения. Найдено, что на каждом уровне «быстрой» подсистемы расположено семейство уровней «медленной» подсистемы. Причем частота внутризонного перехода между уровнями энергии попадает в ИК-часть спектра, а частота межзонного перехода — в видимую часть спектра, позволяющий рассматривать конические КТ как потенциальные базовые элементы для создания КТ-светодиодов. Показано также, что для радиальных квантовых чисел разрешены переходы между уровнями с одинаковыми квантовыми числами, а для главного квантового числа разрешены любые переходы между разными уровнями. Рассмотрена также зависимость энергетических уровней от геометрических параметров конической КТ и величины внешнего электрического поля. Указано, что последнее приводит к изменению области локализации электронов и уменьшению их энергии. Причем с увеличением аксиального квантового числа область локализации электрона смещается в сторону конической вершины КТ. Получено также, что при малых значениях отношения высота/радиус зависимость z-компоненты дипольного момента носит нелинейный характер.

На ряду имеющихся результатов хотелось бы выделить следующие:

1. Автор исследовал уникальные наноструктуры, представляющие собой большой набор полупроводниковых КТ с нетривиальной геометрией (сферические, цилиндрические, эллипсоидальные, конические, сферических КТ ядро/оболочка);
2. Автором разработаны совокупные и адекватные точно решаемые аналитические модели с различными потенциалами квантового ограничения в полупроводниковых КТ с нетривиальной геометрией для исследования одночастичных и кулоновских состояний (примеси, экситоны, экситонные комплексы) в условиях как неучета, так и с учетом внешних воздействий;
3. Автором построена теория межзонного поглощения в КТ различных геометрических форм и размеров, а также анализированы зависимости пороговых частот поглощения соответственно от коррелированных величин геометрических параметров КТ и внешних полей.
4. Автором показано, что в случае сильно сплюснутой эллипсоидальной КТ может возникнуть ситуация, когда реализуются условия выполнения обобщенной теоремы Кона.
5. Автором впервые изучено эффект Тальбота в ансамбле вертикально связанных цилиндрических квантовых точек, освещаемом зондирующими и периодически модулированными полями связи.

На наш взгляд, диссертационная работа не лишена ряда недостатков.

1. В работе при нахождении энергетического спектра как одночастичных, так и кулоновских состояний применяются модели КТ при потенциале ограничения с непроницаемыми стенками при

которых игнорируются разности эффективных масс носителей в соседствующих средах. С целью более последовательного рассмотрения вопроса и исходя из практической ситуации следовало бы рассматривать также случай ограничивающего потенциала конечной высоты с применением соответствующих граничных условий, например: Бен-Даниэля-Дьюка.

2. В работе исследование задач с учетом кулоновских состояний проведено только на фоне однородной поляризации диэлектрической среды. Явление неоднородной поляризации в гетерогенной системе КТ/барьерная среда не изучено.

3. В соответствии с более модельным выбором реалистичной КТ в гамильтониане одночастичных состояний введены безразмерные подгоночные параметры γ , δ_ω и δ_n которые следует определить в соответствии с экспериментальными оценками. При выполнении численных оценок следовало реалистично описать и конкретизировать значения указанных параметров исходя из выбранных материальных моделей.

4. При сравнении значений энергии основного и первого возбужденного состояний с результатами работы [300] имеется определенное расхождение в темпе роста указанных величин (Табл.1, стр.64). Желательно было дать описание физических причин такого поведения.

5. При оформлении текста следовало более информативно предоставить схематические описания обследуемых моделей КТ.

Однако, перечисленные недостатки никоим образом не могут влиять на **достоверность и практическую ценность** представленных результатов, на общее заключение **о должном научном уровне** выполненной работы, а также ее **важности для физики квантовых наноструктур**. Материалы диссертации опубликованы в известных международных и национальных журналах, апробированы на авторитетных конференциях и семинарах. Диссертация отличается также всеобъемлющим анализом использованной литературы.

Автореферат и публикации полно отражают содержание диссертации.

Исходя из вышесказанного, можем заключить, что диссертационная работа **Айрапетяна Давида Борисевича** по теме “ **Исследование электродинамических и оптических характеристик нульмерных квантовых структур** ” представляет собой **законченное научное исследование** и может вносить **весомый вклад** в полупроводниковую нанофизику. Считаю, что она **удовлетворяет** всем требованиям предъявляемым к докторским диссертациям по шифру У.04.10 “Физика полупроводников”, а ее автор **Давид Борисевич Айрапетян** несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по указанной специализации.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор



К.Г.Агаронян

Подпись К.Г. Агароняна подтверждаю,
ученый-секретарь Российско-Армянского
университета

Р.С. Касабабова

11.01.2024