

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Семиной Марины Александровны
«Теория кулоновских комплексов в полупроводниках и наносистемах»
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности – 01.04.02 – теоретическая физика.

Характеристики полупроводниковых излучающих устройств во многом определяются свойствами экситонов и экситонных комплексов, в первую очередь, положительных и отрицательных трионов. В гетеро- и нано-системах могут существовать такие двух и трех частичные связанные состояния, которые не реализуются в объемном материале. По сравнению с квантовой задачей о состоянии ионов H^- или H_2^+ в полупроводниковых структурах ситуация гораздо богаче. Массы электрона и дырки могут иметь разное соотношение, строение зон таково, что простой моделью эффективной массы не обойдешься, и возникает большое разнообразие типов заряженных комплексов. Понимание их свойств позволяет, меняя параметры системы, менять и ее оптические свойства. Структуры пониженной размерности хороши также тем, что в них усиливаются эффекты кулоновского взаимодействия, что приводит к увеличению энергий связи комплексов и делает их видимыми при комнатной температуре.

Кроме некоторых специальных случаев невозможно найти аналитическое решение для волновых функций и энергий экситонов и трионов в полупроводниковых структурах с ограниченной геометрией. Поэтому становится актуальной задача приближенного поиска энергий этих комплексов. В диссертации продемонстрировано, что вариационный метод вычисления свойств кулоновских комплексов может дать очень хорошие результаты.

Поскольку в диссертации представлено много материала о свойствах заряженных комплексов для различных полупроводниковых структур, остановлюсь только на некоторых наиболее интересных, с моей точки зрения, результатах.

В 1 главе показано, как изменяются энергии связи экситонов и трионов в условиях ограниченной геометрии. Здесь интересно применение адиабатического приближения для решения задачи о состояниях X^+ триона. Появляются, в каком-то смысле, новые серии трионных состояний, классифицирующиеся по возбужденным электронным состояниям в трионе. Также здесь получен довольно простой, но важный ответ, что наблюдающееся в экспериментах по сравнению с предсказанным теорией увеличение энергии связи трионов в узких квантовых ямах, а также в квантовых проволоках, может быть объяснено их локализацией на неоднородностях интерфейсов.

Во второй главе показано, что строение экситонных комплексов может быть довольно сложным, если рассматривать реальные полупроводники с шестью состояниями в

валентной зоне. В этом случае задачу приходится решать с учетом матричной структуры гамильтониана. Получен новый результат, что из-за влияния локализации на смешивание состояний тяжелых и легких дырок энергии связи состояния на акцепторе могут немонотонно зависеть от характерного размера системы. Также оказалось, что из-за смешивания разных зон эффективный g -фактор дырок меняется от размеров системы.

В 3-ей главе, где рассматриваются квантовые точки на основе полупроводников II-VI довольно яркий результат – это объяснение резкого сдвига максимума полосы излучения при уменьшении частоты возбуждающего света. Было показано, что ферстеровский безизлучательный перенос возбуждения существенно влияет на кинетику фотолюминесценции в неоднородных ансамблях квантовых точек CdSe/ZnSe. При этом резкий сдвиг максимума полосы излучения связан с выключением ферстеровского механизма переноса энергии между квантовыми точками определенного размера в таких неоднородных ансамблях.

В 4 главе описана тонкая структура линий трионов в двумерных слоистых соединениях дихалькогенидов переходных металлов, появляющаяся из-за сложного строения валентной зоны и зоны проводимости. Показано, что для описания этой структуры необходимо учитывать короткодействующее обменное взаимодействие.

В общем то простой эффект локальной неоднородности поля (эффект Парселла) – в этих соединениях объясняет достаточно большую интенсивность люминесценции $2S$ состояний экситона, сравнимую с основной линией $1S$. Понимая этот эффект, вообще говоря, можно целенаправленно усиливать какую-то линию излучения.

В 5 главе о ридберговских экситонах в закиси меди интересно поведение линий экситонов с разными орбитальными числами в электрическом поле. В диссертации объяснено, как происходит исчезновение линий за счет нерадиационного туннельного распада высоких экситонных состояний при увеличении напряженности поля. При этом оказывается, что с увеличением поля сначала исчезают мультиплеты состояний с большими энергиями (большими квантовыми числами n), а вот линии внутри мультиплета, наоборот, исчезают, начиная с длинноволновой области. Надо сказать, что, если бы не было теории, невозможно было бы определить происхождение различных линий в эксперименте из-за сильного смешивания разных состояний.

Безусловный общий плюс диссертации – это ясность используемых предположений и физической картины. Во многих случаях дается сравнение вариационных расчетов с более точными, но более трудоемкими расчетами. Хорошее согласие разных методов показывает, что трудоемкий расчет в большинстве случаев не является необходимым.

Несмотря на очень подробно написанный, в целом, текст, некоторые вопросы и замечания все-таки возникают.

Вид формулы 1.20, на мой взгляд, не до конца обоснован. Непонятно, почему просто не поставить знак минус перед второй экспонентой в первой скобке, сделав функцию антисимметричной. Появляется вопрос, что улучшает дополнительный фактор $(z_1 - z_2)$ в формуле 1.20.

В диссертации рассмотрен случай, когда потенциалы неоднородностей для электрона и дырки (1.81), (1.82) центрированы в одной точке пространства. Возможно, больше отвечает реальности случай, когда минимумы потенциала для электрона и дырки находятся в разных точках. Вообще говоря, лучше было бы рассматривать некоторый статистический разброс по относительному расположению локализуемых потенциалов для разных носителей.

В главе 3 считается, что изменение состава квантовой точки отражается только в изменении высоты барьера на границе. Но ведь изменение состава должно менять и параметры гамильтониана Латтинджера.

Небольшое замечание, что всегда нагляднее сравнивать энергии связи трионов, биекситонов с энергией экситона. На Рис 3.10б, 3.11 - энергия связи биекситонов составляет несколько эффективных Ридбергов, что кажется большой величиной. Только сравнением с рис 3.8 можно понять, насколько эта энергия меньше экситонной.

Кажется, что при размере ридберговских экситонов порядка $1 \mu\text{m}$, все мультиполи должны излучать примерно одинаково, так как размер экситона стал даже больше длины волны излучаемого света. Поэтому кажется, что пики, скажем, для $n > 20$, должны складываться из большого числа мультипольных линий.

Эти замечания касаются некоторых небольших уточнений и не затрагивают основные результаты диссертации. Вошедшие в диссертацию результаты были своевременно опубликованы в 27 статьях в ведущих журналах по физике, рекомендованных ВАК России и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Все статьи, собранные в диссертацию, объединены единой тематикой и представляют собой законченный цикл исследований. Применяемые теоретические методы должны обеспечивать высокую достоверность результатов, что также подтверждается и сравнением с экспериментальными данными. Результаты докладывались на большом количестве семинаров, российских и международных конференций, их корректность и обоснованность не вызывает сомнений. В автореферате правильно и полностью изложено содержание диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Семиной Марины Александровны «Теория кулоновских комплексов в полупроводниках и наносистемах» полностью удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

10 апреля 2020 г.

Официальный оппонент

Арсеев Петр Иварович

Гнс Отделения теоретической физики им. И.Е. Тамма
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН
Почтовый адрес: 119991 Москва,
Ленинский проспект 53
Тел. 499-1326271
ars@lpi.ru

Подпись П.И.Арсеева заверяю

Заместитель директора ФИАН,
д.ф.-м.н.

С.Ю.Савинов