

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе  
Родиной Анны Валерьевны  
«Оптические и спиновые явления в полупроводниковых коллоидных нанокристаллах»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности – 01.04.10 – физика полупроводников.

Появление таких объектов, как полупроводниковые квантовые точки, открыло новую область исследований в физике полупроводников. В частности, особенности взаимодействия электронов в квантовых точках с электромагнитным излучением делают квантовые точки уникальными объектами для создания излучателей и приемников света. Появляется возможность сравнительно простыми технологическими методами влиять на спектры поглощения и фотолюминесценции полупроводниковых устройств. Один из методов - выращивание квантовых точек в коллоидных растворах - позволяет регулярным образом создавать нанокристаллы заданного размера и правильной формы.

Широко применяемым в технологии коллоидного роста соединением является полупроводник CdSe. Однако учет эффектов размерного квантования в малых нанокристаллах CdSe оказывается очень нетривиальным, даже простейшая задача о построении размерно-квантованных состояний электронов и дырок является сложной. Дело в том, что у CdSe сложное строение состояний валентной зоны из-за спин-орбитального взаимодействия, а полное описание зонного спектра требует применения восьмизонной модели типа Кейне. В фотолюминесценции основную роль играют экситоны и экситонные комплексы, их описание в квантовых точках необходимо для понимания экспериментов, но это представляет собой еще более трудную теоретическую задачу.

Эта задача была решена в работах А.В.Родиной, вошедших в диссертацию. Полученные ею результаты сделали понятными многие экспериментальные зависимости фотолюминесценции коллоидных нанокристаллов. Созданная теоретическая база позволяет не только объяснять существующие эксперименты, но и целенаправленно добиваться нужных параметров люминесценции. Так что актуальность и практическая значимость диссертации А.В.Родиной не вызывает никаких сомнений.

Если говорить о фундаменте, на котором основан весь цикл работ, то это последовательный, аккуратный анализ того, как устроены состояния размерного квантования электронов и дырок в квантовых точках полупроводников типа CdSe различной формы и при наличии магнитного поля. Как уже говорилось, задача непростая из-за сложного строения валентной зоны и неприменимости простых подходов

эффективной массы. Последовательное описание размерного квантования и вычисление волновых функций электронов и дырок позволило в дальнейшем объяснить большое количество эффектов, связанных с поглощением и люминесценцией квантовых точек. Заметим, что некоторые экспериментальные факты не были объяснены в течение 20 лет, и только в работах автора появилось их адекватное объяснение.

Для проверки основ теории в главе 1 проведено сопоставление экспериментальных спектров поглощения в квантовых точках с рассчитанным положением квантованных уровней и интенсивностью поглощения в различных линиях. Достаточно хорошее согласие между экспериментом и теорией дало возможность определить параметры теоретической модели.

Очень существенной для развития теории является вторая глава. В ней разбирается, как надо правильно ставить граничные условия в рамках  $kr$  – приближения для многозонных моделей. В результате этого анализа автором получены обобщенные граничные условия, которые и использовались в дальнейших вычислениях.

На мой взгляд, смысловым центром диссертации являются главы 3 и 4. В главе 3 подробно рассмотрены механизмы, которые могут приводить к высвечиванию темного экситона. А.В.Родиной был предложен новый механизм такой активации излучения темного экситона за счет обменного взаимодействия спина электрона со спином локализованного состояния на оборванной связи на поверхности нанокристалла. Это взаимодействие приводит к перевороту спина электрона, подмешивая тем самым состояние светлого экситона к состоянию темного. Такой механизм позволил объяснить резкое увеличение интенсивности бесфононной линии люминесценции с ростом температуры в той области, где прямая термоактивация светлого экситона еще мала. Удалось также описать количественно температурную зависимость стоксового сдвига линии люминесценции. Из полученных формул последовал красивый результат, что стоксов сдвиг параметрически связан с отношением интенсивности бесфононной и первой фононной линии. В эксперименте эта зависимость прекрасно подтверждается.

Оказалось существенным, что предложенный обменный механизм активации излучения темного экситона ведет также к упорядочиванию спинов оборванных связей на поверхности. В работах А.В.Родиной был впервые рассмотрен эффект динамической спиновой поляризации таких поверхностных состояний при фотолюминесценции в квантовых точках. Найдена критическая температура образования такого спинового полярона на поверхности квантовой точки, зависимость его характеристик от температуры, размеров квантовой точки и других параметров.

Имея последовательную теорию, можно из поляризационных измерений фотолюминесценции и ее динамики во времени получать информацию о тонкой структуре экситона, об излучающих состояниях и механизмах активации темного экситона. Как это делать и какую информацию можно получить, разбирается в трех последних главах диссертации. Здесь рассмотрено довольно много новых и полезных результатов, не буду их повторять, приведу один. Полученные теоретические формулы для степени циркулярной поляризации фотолюминесценции, определяемой разной заселенностью спиновых подуровней в магнитном поле, впервые дали возможность напрямую определить  $g$ -фактор дырок в нанокристаллах CdSe из эксперимента.

Последовательность, с которой изложен материал в диссертации, оставляет мало возможностей для замечаний. Вопросы, которые можно задать автору, носят скорее характер пожеланий.

При сравнении экспериментальной зависимости эффективного  $g$ -фактора электрона от радиуса КТ с теорией на рисунке 2.6 видно, что эксперимент явно соответствует некоторому отрицательному значению параметра  $T_a$ , использовавшегося в обобщенных граничных условиях. Однако утверждение, что  $T_a$  равно именно  $-0.6$  представляется превышением точности.

В задаче о трионе в квантовых точках с оболочкой учитывается изменение волновой функции электрона из-за кулоновского потенциала дырок. В то же время, в предыдущих разделах, посвященных экситонам и биэкситонам, самосогласованное изменение удерживающего потенциала квантовой точки из-за кулоновского взаимодействия электронов и дырок не учитывалось. Роль такого самосогласованного потенциала действительно мала в нанокристаллах малых размеров, его учет несущественен для качественных и параметрических зависимостей. Но для абсолютных значений энергии уровней, когда речь идет о масштабах, порядка  $10\text{meV}$ , это могло бы быть существенно.

Мне также кажется, что некоторые явления, упоминающиеся в главе 7, могут составить предмет для дальнейшей работы. Так, показанная на рис.7.9 экспериментальная зависимость обратного времени спиновой релаксации от температуры скорее имеет тенденцию к насыщению и не очень хорошо совпадает с теоретической кривой. Возможно, это требует дальнейшего развития теории.

Высказанные замечания никак не влияют на безусловно положительную оценку диссертации. Вошедшие в диссертацию работы действительно составляют единый цикл, текст написан последовательно и весьма подробно, что облегчает понимание сути полученных результатов. Данная диссертация представляет собой законченную научную работу, выполненную на высоком уровне. Представленные в ней новые результаты были

получены автором самостоятельно. Более того, в диссертации исправлены некоторые ошибочные результаты других авторов, полученные ранее.

Достоверность всех вошедших в диссертацию результатов обеспечивается применением адекватных теоретических методов и подтверждается сравнением с экспериментальными данными. Основные результаты диссертационной работы А.В.Родиной были своевременно опубликованы в 26 статьях в ведущих журналах по физике, рекомендованных ВАК России и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и в главе монографии-сборника. В опубликованных статьях полностью изложены положения диссертации, выносимые на защиту. Также результаты докладывались на большом количестве семинаров, российских и международных конференций. Нет сомнений, что сделанные автором выводы обоснованны.

В автореферате правильно и полностью изложено содержание диссертационной работы.

Таким образом, диссертация Родиной Анны Валерьевны «Оптические и спиновые явления в полупроводниковых коллоидных нанокристаллах», 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 01.04.10 – физика полупроводников.

31 октября 2016 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