

В Диссертационный совет  
Д 002.205.02  
при ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
194021, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 26

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Дубровского Владимира Германовича на  
диссертационную работу Самосвата Дмитрия Михайловича  
«Безызлучательные переходы и перенос энергии в полупроводниковых  
квантовых точках», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

В последние десятилетия квантово-размерные наногетероструктуры вызывают все больший интерес в связи с их применением в лазерах и светодиодах, а также в различных хемо- и биосенсорах. По этой причине становится важным детальное теоретическое описание фотонных процессов, происходящих в наногетероструктурах при различных уровнях возбуждения. Свойства полупроводниковых наносистем принципиально отличаются от свойств объемного полупроводника в силу эффекта размерного квантования. Одним из наиболее важных эффектов, претерпевающих изменения в квантоворазмерных гетероструктурах является эффект оже-рекомбинации. Являясь по сути своей квантовым эффектом, он имеет важные отличительные особенности в квантовых ямах и в квантовых нитях по сравнению с объемным однородным полупроводником. Хотя эффект оже-рекомбинации был исследован экспериментально в квантовых точках, детальное исследование (на микроскопическом уровне), механизмов его возникновения и подавления в настоящее время отсутствует.

Квантовые точки в силу их уникальных физико-химических свойств находят

свое применение в роли сенсоров в задачах биологии и медицины. В настоящее время оказывается возможным применение квантовых точек, покрытых тонким слоем полимерного материала, в качестве биосенсора для определения типа аминокислоты, либо иной биологической молекулы по создаваемому последней электрическому полю. Такие квантовые точки носят название открытых в силу того, что время жизни носителей заряда в них конечно. В открытых квантовых точках вероятность туннелирования электрона сквозь барьер отлична от нуля. И если задача о спектре открытых квантовых точек на настоящий момент решена, то вопрос о сдвиге квазистационарных состояний во внешнем электрическом поле остается открытым.

Квантовые точки находят свое применение также при создании сенсоров, пригодных для идентификации связывания сложных биологических молекул, таких как белки и цепочки ДНК. В основе принципа работы таких сенсоров лежит сильная зависимость вероятности безызлучательного резонансного переноса энергии между двумя полупроводниковыми квантовыми точками. В этом случае, к одной биомолекуле присоединяется одна квантовая точка, а к другой – вторая. Тогда, при связывании этих молекул оказывается возможным экспериментальное наблюдение тушения флюоресценции одной квантовой точки и передачу этой энергии второй, флюоресценцию которой можно наблюдать в эксперименте.

Таким образом, тема диссертационной работы Д.М. Самосвата представляется весьма актуальной.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и библиографии.

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель работы, ее научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована их научная и практическая значимость. Также приведен список публикаций и конференций, на которых материалы диссертации прошли апробацию.

Вступительная глава диссертации посвящена обзору литературы по данной

теме. Кратко изложено современное состояние исследований по оже-рекомбинации в квантовых точках, эффекту Штарка и безызлучательному резонансному переносу энергии между двумя полупроводниковыми квантовыми точками.

Первая глава целиком посвящена эффекту оже-рекомбинации. Рассмотрен матричный элемент такого процесса. Показано, что он может быть разделен на два вклада: беспороговый и квазипороговый. Эти два вклада имеют различную физическую природу. Беспороговый матричный элемент связан с рассеянием нормальной к гетерогранице компоненты квазиимпульса. Квазипороговый процесс связан с пространственным ограничением волновых функций носителей заряда в квантовой точке. Кроме этого, рассмотрены и проанализированы радиальные и температурные зависимости коэффициентов оже-рекомбинации. Предложен новый механизм подавления оже-процесса при низких температурах, когда носители заселяют только основной уровень размерного квантования.

Во второй главе рассмотрена модификация теории возмущений для квазистационарных состояний. С ее помощью вычислен сдвиг энергии и изменение ее полуширины во внешнем однородном электрическом поле. Отмечу оригинальность этих результатов, так как теория возмущений для квазистационарных состояний развита недостаточно. Также рассмотрен квазиклассический подход к квазистационарным состояниям, который позволил вычислить сдвиг энергии и изменение ее полуширины в открытой квантовой яме. Показано, что существует критическое положение уровня энергии, при котором полуширина меняет свой знак.

Третья глава посвящена безызлучательному резонансному переносу энергии между двумя полупроводниковыми квантовыми точками. Рассчитан вклад как чисто кулоновского механизма (без учета и с учетом подмешивания), так и вклад с учетом обменного взаимодействия. В силу двукратного вырождения тяжелых дырок в модели Кейна, показано, что существует два матричных элемента, отвечающих переносу энергии с участием функций тяжелых дырок

различной поляризации. Кроме этого, проанализирован матричный элемент обменного переноса, чем обычно пренебрегают.

Обобщение полученных результатов вынесено в заключение.

Все указанные выше результаты являются новыми.

Достоверность результатов диссертационной работы определяется использованием адекватных моделей и методов современной физики, а также совпадением с известными результатами в предельных случаях.

Следует отметить ряд недостатков в работе Д.М. Самосвата:

1) В обосновании актуальности темы диссертационной работы (с. 9 текста диссертации) я бы не стал указывать лазеры на квантовых точках, для создания которых «важно понимать, какие механизмы приводят к повышению плотности порогового тока», а говорил бы больше о сенсорах. Лазеры на квантовых точках уже давно созданы и промышленно производятся, фактически, все научные вопросы в данной области закрыты.

2) При рассмотрении волновых функций в Главе I автор не обсуждает геометрию квантовых точек, для которой проводятся расчеты. Судя по всему, что используется разделение переменных в сферической системе координат, речь идет о сферической геометрии. Это, возможно, подходит для коллоидных квантовых точек, но не для эпитаксиальных островков Странского-Крастанова, на которых работают лазеры. То же замечание относится к Главе II, где, правда, с самого начала сказано (стр. 65), что квантовая точка сферическая.

3) Неясно, что такое процессы «СНСС и СННС» на стр. 27 – ранее такая аббревиатура не вводится.

4) Математическая запись формул во многих случаях громоздка и сложна для восприятия, см., например, формулу (2.6), занимающую почти всю страницу.

5) Общее замечание ко всем главам: В работе проведено достаточное количество расчетов для конкретных систем, однако я не нашел непосредственного сравнения теории с экспериментом. В Главе I присутствует экспериментальная часть, но она, на мой взгляд, слабо связана с остальным

материалом.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, выполненной на высоком научном уровне и являющейся законченным исследованием. Все результаты диссертации многократно докладывались на конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. По количеству статей в журналах (6 штук) диссертационная работа заметно превышает требования ВАК и средний уровень диссертаций, защищаемых в настоящее время. Положения, выносимые на защиту, обоснованы. Автореферат достаточно полно и правильно отражает основное содержание диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Д.М. Самосвата отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Заведующий лабораторией физики наноструктур,

Заведующий кафедрой теоретической физики,

доктор физико-математических наук

В.Г. Дубровский

Подпись В.Г. Дубровского заверяю:

Проректор

А.Е. Жуков

Санкт-Петербургский академический университет

Ул. Хлопина, д. 8/3, 194021 Санкт-Петербург

Телефон: (812) 448 6982

Эл. почта: dubrovskii@mail.ioffe.ru

2 ноября 2015 г.