

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Косарева Александра Николаевича

«Электронно-дырочные пары, локализованные в системах квантовых точек InGaAs»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика

конденсированного состояния.

Рецензируемая диссертация посвящена изучению механизмов, определяющих степень локализации и время жизни носителей заряда в полупроводниковых квантовых точках (КТ). Несмотря на то, что изучение нульмерных полупроводниковых объектов вот уже более 30 лет является предметом интенсивных исследований во всем мире, интерес к ним продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение электрон-фотонного взаимодействия в квантовых точках позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для совершенствования уже имеющихся и создания новых типов полупроводниковых приборов, а так же стимулирует развитие новых технологий. Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно, является **актуальной**, а поскольку, несмотря на прогресс в области создания гибридных гетероструктур металл/полупроводниковая КТ, возможности управления временем жизни электронных возбуждений в этих объектах, изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из **введения, трех глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований. В **первой главе** автор приводит обзор литературы, посвященной характеристикам и областям применения структур с квантовыми точками, и рассматривает некоторые аспекты получения самоорганизованных КТ и гибридных структур на их основе.

В оригинальной части диссертации, **Главы 2 и 3**, рассматриваются две основные задачи. **Первая** из них заключалась в моделировании квантовых состояний электронов и дырок, локализованных в КТ InGaAs. Используя экспериментально определенное, с высокой точностью, пространственное распределение состава твердого раствора в КТ, автор рассчитывает пространственное распределение механических напряжений в структуре с КТ и определяет локализуемые потенциалы для электронов и тяжелых дырок, которые в дальнейшем использовались при решении уравнения Шредингера. Проведены расчеты энергии локализации носителей заряда в зависимости от соотношения высоты КТ и к длине ее основания при фиксированном объеме КТ. Рассмотрены две конфигурации: КТ в матрице GaAs и КТ в квантовой яме, с граничными условиями, соответствующими гетероструктурам, с напряжениями, не превышающими порога введения дислокаций несоответствия. Для первой конфигурации расчеты предсказывают существование выраженного энергетического минимума для состояний электрона при определенном соотношении высоты КТ к длине основания. Во второй конфигурации, расчетным методом определены размеры КТ и состав твердого раствора, обеспечивающие наибольшую локализацию экситонов для КТ в КЯ.

Вторая задача диссертации, заключалась в исследовании оптических свойств гибридных гетероструктур КТ InGaAs/металлические наночастицы. В работе рассматривалось два типа наночастиц: (1) проводящие кластеры мышьяка, сформированные в низкотемпературном нестехиометрическом

покровном слое GaAs и (2) кластеры серебра на поверхности гетероструктуры с КТ. После описания процессов получения структур с КТ и методических вопросов проводимых исследований, автор показывает, что ведение тонкого (порядка 5 нм) буферного слоя, выращенного при высокой температуре эпитаксии, между массивом КТ и слоем LT-GaAs позволяет: (1) Подавить образование дислокаций несоответствия на гетерогранице КТ-GaAs; (2) Управлять вероятностью туннелирования электронов из КТ на дефектные состояния в покровном слое LT-GaAs, посредством изменения проницаемости энергетического барьера для электрона, за счет включения в состав этого буферного слоя широкозонной вставки из AlAs.

В работе продемонстрировано, что нанесение на поверхность гетероструктуры с КТ тонкого слоя атомов серебра, может приводить как к возрастанию, так и к уменьшению интенсивности ФЛ от ансамбля КТ. Сделан вывод о том, что осаждение металла на поверхность приводит к изменению туннельной проницаемости барьера между электронами, локализованными в КТ и поверхностными электронными состояниями, за счет изменения электрического потенциала поверхности.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность новых результатов, которые, с одной стороны, дают физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны, инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы расширяют существующие представления о механизмах локализации носителей заряда в КТ InGaAs с неоднородным распределением состава твердого раствора. По результатам проводимых исследований созданы предпосылки для разработки устройств записи, хранения и чтения информации,

использующих локализованные состояния носителей заряда в КТ, что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. Отточенность формулировок не является сильной стороной автора диссертации. На мой взгляд, некоторые обобщения в тексте диссертации сформулированы избыточно смело. Например: (а) Утверждение пункта № 3 в параграфе научная новизна о том, что моделирование, каких то параметров КТ для которой экспериментально определены размер, форма и пространственное распределение состава, проводилось впервые, слегка запоздало; (б) Утверждение о том, что GaAs и InAs значительно уступают Si по «отлаженности технологий массового производства», мягко говоря, не соответствует существующему положению дел; (в) Во введении в одном и том же абзаце, написано, что КТ с одной стороны «являются хорошим источником фотонов с квантовым выходом близким к единице», а с другой стороны «время излучательной рекомбинации экситонов, локализованных в КТ, велико и может достигать 1 нс, что является лимитирующим фактором для использования КТ в качестве эффективного источника фотонов». Тут просто хотелось бы понять, а что в этом тексте подразумевается под термином *эффективность* для источника фотонов, имеющего КПД излучения почти 100 %?

2. При соотношении диаметра КТ к её высоте, соответствующем экспериментально определенным размерам КТ, расчеты по предложенной автором модели, учитывающей неоднородное распределение деформации в объеме гетероструктуры с КТ и расчеты по модели, учитывающей только изотропную гидростатическую деформацию, дают одни и те же значения энергий локализации электронов и дырок! Как мы можем понять, что одна из этих моделей адекватнее описывает энергетический спектр КТ, чем другая?

3. В работе показано, что: (1) При изучении структур с КТ, заращиваемыми слоем LT GaAs, наблюдаемые изменения энергетического положения и

интенсивности полос ФЛ, связанных с рекомбинацией экситонов в КТ, определяются процессами взаимодействия носителей заряда в КТ с дефектными состояниями в слое LT GaAs; (2) При изучении структур с КТ и нанесенными на поверхность структуры кластерами серебра связанное с этим нанесением металла изменение интенсивности ФЛ, обусловлено туннелированием электронов из КТ к поверхностным центрам безызлучательной рекомбинации. Хотелось бы понять, а какую роль в этих процессах играют собственно плазмоны, о которой говорилось во введении к работе?

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация А.Н. Косарева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для понимания механизмов, ответственных за взаимодействие, локализованных в InGaAs КТ носителей заряда с дефектами и металлическими наночастицами.

Достоверность и обоснованность результатов определяется проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в международных и российских научных журналах, доложены на ведущих международных и российских научных конференциях. Название и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности. Автореферат **правильно передает содержание диссертации.**

Считаю, что диссертационная работа Косарева Александра Николаевича «Электронно-дырочные пары, локализованные в системах квантовых точек InGaAs» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 "Физика конденсированного

состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Косарев Александр Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

д.ф.-м.н.,

доцент по специальности физика полупроводников

_____ Тимур Сезгирович Шамирзаев

«29» 09 2023 г.

01.04.10 – физика полупроводников

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН
Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.

_____ С.А. Аржанникова