



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Ж.И. АЛФЕРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
Телефон (факс): (812) 297-2145

www.spbau.ru

ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879

ИНН/КПП 7804161723/780401001

18 ОКТ 2023

№

500

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке СПбАУ РАН

им. Ж.И. Алферова, чл-корр. РАН

Егоров А.Ю.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» на диссертацию **Косарева Александра Николаевича «Электронно-дырочные пары, локализованные в системах квантовых точек InGaAs»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы. Квантовые точки (КТ) на основе InGaAs/GaAs являются важным объектом в современной физике наноструктур и имеют множество потенциальных применений, среди которых можно выделить их использование в качестве активной области лазеров, а также источников одиночных или переплетенных фотонов. Такой набор характеристик делает КТ на основе InGaAs/GaAs перспективными, в частности, для использования в криптографических системах оптоволоконных линий связи. Данная работа посвящена решению двух актуальных проблем, связанных с КТ на основе InGaAs, а именно проблеме усиления локализации носителей заряда и проблеме управления временем жизни носителей в таких КТ. Увеличение локализации носителей позволит, в частности, добиться смещения частот оптических резонансов в длинноволновую сторону, позволяя излучать фотоны с длинами волн телекоммуникационных частотных полос. Понимание механизмов, ответственных за этот процесс, необходимо для формирования наноструктур с требуемыми оптическими свойствами. Управление временем жизни носителей заряда в КТ необходимо не только для повышения коэффициента полезного действия приборов, но и для повышения их быстродействия. Обе указанные выше задачи являются **практически важными и актуальными** как для фундаментальной, так и для прикладной науки.

Работа состоит из трёх глав, первая из них посвящена обзору литературы. Оригинальные результаты представлены во второй и третьей главах.

Первая глава начинается с описания актуальности полупроводниковых гетероструктур в системе материалов АЗВ5 и преимуществ использования структур пониженной размерности, что обуславливает интерес к КТ InGaAs/GaAs. Также этой главе описывается и потенциальное применение КТ для квантовых технологий. Излагаются методы формирования наноструктур, обсуждается локализация носителей внутри КТ. В заключительный раздел посвящен гибридизации экситонов и плазмонных возбуждений за

счёт их взаимодействия в ближнем поле. На основе изложенного формулируются актуальные нерешённые проблемы.

Вторая глава посвящена исследованию локализации электронов и дырок в КТ InGaAs/GaAs, сформированных методом Странского-Крастанова, при помощи численного моделирования. Определяющим фактором локализации рассматриваемых носителей заряда является локализирующий потенциал, чья форма определяется геометрией, химическим составом и встроенным полем механических напряжений-деформаций. В первом разделе главы показано, что изменение соотношения высоты к длине основания КТ, помещённой в полупроводниковую матрицу, приводит к существенному перераспределению компонент механического поля, что, в свою очередь, создает условия для максимально сильной локализации носителей в квантовой точке.

Во втором разделе второй главы исследовалась структура DWELL (dot in a well). Проведенные расчеты показали, что самоорганизованная КТ, встроенная в квантовую яму, может обеспечить более глубокую локализацию носителей относительно обычной КТ благодаря комплексному действию трех процессов: увеличения объема КТ, изменения соотношения ширины и высоты КТ и перераспределения деформации из-за наличия напряженной квантовой ямы. Для квантовой точки InAs и квантовой ямы InGaAs рассчитана величина увеличения энергии локализации за счёт трех данных вкладов и определена оптимальная конфигурация точки в яме, сохраняющая когерентность интерфейсов.

В третьем разделе второй главы описывается модель эпитаксиальной самоорганизованной КТ InGaAs в объеме GaAs, которая учитывает экспериментально определенное распределение индия внутри КТ и ее форму. Данные микроскопии высокого разрешения были использованы для того, чтобы получить экспериментально верифицированное пространственное распределения концентрации In в твёрдом растворе InGaAs. Решение задачи упругой механики позволило определить компоненты полей упругой деформации и, исходя из них, локализирующий потенциал для электронов и тяжёлых дырок. Полученные в результате моделирования эпитаксиальных самоорганизованных КТ InGaAs/GaAs энергии оптического излучения хорошо согласуются с экспериментальными спектрами для того же образца.

В третьей главе диссертации изучалось изменение оптических свойств КТ InGaAs/GaAs, при формировании в непосредственной близости от них системы металлических наночастиц. Первый раздел посвящен КТ InGaAs, выращенным слоем GaAs при пониженной температуре. Автор исследовал влияние буферного слоя различного состава между КТ и GaAs, выращенным при пониженной температуре, на взаимодействие между КТ и металлическими наночастицами. Были выявлены основные процессы, ответственные за это взаимодействие, а именно: нарушение когерентности интерфейса при выращивании слоя из низкотемпературного GaAs, а также туннелирование носителей из КТ в континуум состояний в низкотемпературном GaAs с последующей безызлучательной рекомбинацией. Прямое выращивание при низкой температуре вызвало образование дислокаций несоответствия и связанное с этим падение интенсивности ФЛ из КТ InGaAs/GaAs. Генерация дефектов подавлялась за счет использования тонких буферных слоев между массивами КТ InGaAs и слоем низкотемпературного GaAs. В случае буферного слоя GaAs толщиной 5 нм фотолюминесценция от КТ InGaAs на два порядка слабее, чем в контрольном образце (не содержащем низкотемпературного слоя) и отличается по спектральному распределению интенсивности. Когда часть буфера GaAs толщиной 2.5 нм была заменена на AlAs, барьер стал непрозрачным для туннелирования электронов из основных состояний в КТ InGaAs. В результате этого интенсивность излучения КТ стала значительно сильнее, а форма линии близка к форме контрольного образца. Было показано, что время жизни неравновесных носителей в КТ InGaAs может быть изменено на два порядка и контролироваться инженерией ширины запрещенной зоны буферного слоя толщиной всего 5 нм.

Во втором разделе третьей главы рассмотрены КТ InGaAs, закрытые слоем AlGaAs толщиной 10 либо 20 нм. На поверхности образцов были сформированы наночастицы Ag

путем напыления тонкой пленки этого материала и последующего отжига. Изучались образцы с различной толщиной закрывающего слоя.

Было обнаружено, что оптические свойства КТ в гибридных структурах, полученных путем совмещения массивов полупроводниковых квантовых точек InGaAs, расположенных в приповерхностном слое, и наночастиц Ag, сформированных на поверхности путём отжига тонкой плёнки, крайне чувствительны к толщине барьера и поверхностному потенциалу. В зависимости от геометрии и туннельной прозрачности разделяющих материалов формирование наночастиц Ag может как усиливать, так и ослаблять безызлучательную рекомбинацию в таких квантовых точках.

В конце диссертации приводится заключение и список используемой литературы.

Новизна исследований и полученных результатов. Работа обладает научной новизной и выполнена на высоком научном уровне. В частности, в результате проведенных теоретических исследований автором впервые определена оптимальная форма квантовых точек InGaAs, обеспечивающая наиболее эффективную глубину локализации носителей заряда и впервые определена оптимальная конфигурация системы DWELL (квантовая точка InAs в квантовой яме InGaAs) и предельно-достижимые параметры локализации носителей заряда в такой системе. Новизна результатов, основанных на экспериментальных исследованиях автора, состоит в определении механизма переноса энергии от квантовых точек к плазмонным наночастицам в исследованных гибридных структурах.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Основные результаты работы содержатся в 10 научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Scopus, Web of Science и РИНЦ. Работа обладает научной новизной и выполнена на высоком научном уровне. Все результаты и выводы работы обоснованы. Достоверность проведенных расчетов подтверждается хорошим согласием их результатов с имеющимися экспериментальными данными. Экспериментальные результаты получены с применением современных методов исследований.

Практическая значимость результатов работы. Результаты исследований, приведенные в диссертации, показывают возможности управления электронной структурой и свойствами КТ InGaAs, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием механизма роста Странского-Крастанова. Такие квантовые точки являются важной составной частью современных электронных, оптоэлектронных и фотонных приборов, как выпускаемых промышленностью, так и находящихся на стадии разработки. Возможности управления глубиной локализации носителей и их временем жизни в КТ имеют ключевое значение как для совершенствования существующих приборов, так и для разработки новых.

Общая оценка диссертационной работы. Автором четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы. В целом диссертация А.Н. Косарева является законченным исследованием и предоставляет решение актуальных задач физики конденсированного состояния, уровень которых соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Замечания по диссертационной работе

- На стр. 29 приведены размеры “типичных КТ”, которые были получены методом просвечивающей электронной микроскопии и использовались для расчета. Не понятно, что автор подразумевает под “типичными КТ” и как они определялась.
- В диссертации не обсуждаются работы других авторов, в частности работы В.Щукина, посвященные расчету формы и размеров КТ, полей упругих деформаций в них.
- При какой температуре на Рис.3 представлены данные энергия экситона в зависимости от соотношения сторон КТ H/L? При комнатной температуре или при

температуре 77К, при которой измерен представленный на рисунке спектр излучения? В целом, как проводилось сравнение результатов теоретических расчетов энергии экситона и экспериментальных данных с учетом неоднородного уширения массива КТ?

- При обсуждении Рис.27 не объясняется, почему энергия экситона растет при увеличении концентрации индия в квантовой яме с 0.3 до 0.7. Имело ли смысл проводить расчет для КТ с длиной основания 38 нм, объем которых значительно превышает критический для образования дислокаций?
- При анализе относительных интенсивностей фотолюминесценции образцов с КТ, приведенных на Рис.3.4 важным фактором является безызлучательная рекомбинация неравновесных носителей в низкотемпературном GaAs, что уменьшает их долю, которая могла быть захвачена в КТ. Проводились ли оценки влияния этого фактора на интенсивность фотолюминесценции исследуемых образцов с КТ?
- На Рис.3.5 максимальная интенсивность накачки составила 75 мВт, при этом не приведена оценка плотности мощности и количества фотовозбужденных фотонов, приходящихся на одну КТ. Хотя в образцах 2251 и 2252 при накачке 75 мВт возбужденные состояния не наблюдались, они могли бы проявиться при более высоких плотностях накачки, которые возможно достичь либо за счет увеличения мощности лазера, либо за счет лучшей фокусировки. Какая накачка использовалась при анализе соотношения интенсивностей спектров фотолюминесценции различных образцов на Рис. 3.7? Ожидается ли изменение этих соотношений при значительном (на несколько порядков) увеличении накачки?
- В работе довольно много стилистических неточностей, в частности употребляются такие выражения как “в разбитой на островки плёнке InGaAs”, “скорости излучательного распада”, “интегральная яркость”.

Приведённые замечания и пожелания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки самой работы.

Заключение

Считаем, что диссертационная Косарева Александра Николаевича «Электронно-дырочные пары, локализованные в системах квантовых точек InGaAs» является актуальным законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты достоверны, выводы обоснованы. Автореферат диссертации корректно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. По значимости и научному уровню результатов диссертация 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.

Отзыв подготовили:

- заведующий лабораторией Нанопотоники, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 – физика полупроводников) Максимов Михаил Викторович

_____ (Максимов М.В.)

- научный сотрудник лаборатории Нанопотоники, кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.10 – физика полупроводников) Зубов Федор Иванович

_____ (Зубов Ф.И.)

Отзыв рассмотрен и утвержден на семинаре лаборатории нанопотоники, протокол №5 от 17 октября 2023г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук»

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, улица Хлопина, дом 8, корпус 3, литер А

Телефон: +7 (812) 247-44-84

Факс: +7 (812) 247-44-84

E-mail: office@spbau.ru,