

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.**

В настоящее время полупроводниковые квантовые точки (КТ) уверенно входят в арсенал средств оптоэлектроники, нанофотоники и квантовых технологий. Существуют различные методы изготовления полупроводниковых КТ, которые приводят к отличиям их свойств и специфике применений. Основные методы могут быть обобщенно разделены на две группы: эпитаксиальные (формирование квантовых точек в низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах) и химические (коллоидный синтез в растворе). Коллоидные КТ были исторически первыми, и важность их открытия и синтеза была в этом году отмечена Нобелевской премией по химии. При этом эпитаксиальные КТ также имеют длительную историю исследований и совершенствования методов выращивания, и имеют значительные преимущества для ряда применений, например, для создания источников одиночных фотонов. При этом большую роль для оптимизации свойств КТ играет понимание механизмов, определяющих степень локализации и время жизни носителей заряда, изучению которых посвящена диссертационная работа А.Н. Косарева. Таким образом, **актуальность темы исследований** не вызывает сомнений. При этом в работе проведены как экспериментальные исследования, так и теоретическое моделирование новых перспективных структур и **получены новые результаты**, важные для развития данной области.

Диссертация состоит из **введения, трех глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** обоснована актуальность исследований,

сформулирована их цель и положения, выносимые на защиту. В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященной основным свойствам и эпитаксиальным методам получения низкоразмерных структур с квантовыми точками, а также их различным применениям.

Главы 2 и 3 относятся к оригинальной части диссертации. В каждой главе приводится дополнительное введение с описанием объектов и методов исследования. **Глава 2** посвящена численному моделированию электронных состояний, локализованных в КТ InGaAs пирамидальной формы внутри GaAs. Целью такого моделирования было определение способов оптимизации формы КТ, позволяющих увеличить глубину локализации электронов и тяжелых дырок. Хотя для расчета электронных состояний была использована однозонная модель эффективной массы, автору удалось сделать важные выводы о влиянии формы КТ, ее окружения и внутреннего состава на глубину локализации. При этом большое внимание было уделено расчету пространственного распределения упругих деформаций в структуре, модулирующих локализуемые потенциалы для носителей заряда. Проведены расчеты энергии локализации носителей заряда в зависимости от соотношения высоты КТ к длине ее основания и сделаны важные выводы о наличии оптимального соотношения, позволяющего получить максимальную локализацию при фиксированном объеме КТ. Другим важным результатом является исследование в рамках созданной модели механизмов, ответственных за увеличение локализации носителей заряда в КТ при формировании структуры типа квантовая точка в квантовой яме, и определение величины их вкладов в изменение глубины локализации.

В третьей главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств гибридных гетероструктур с КТ InGaAs, в том числе содержащих слой с кластерами мышьяка или с наночастицами серебра. Дано описание процессов получения исследуемых структур с КТ и их параметров, а также методики проводимых исследований. Результаты исследований и их моделирования позволили

сделать вывод о том, что основным механизмом безызлучательного распада экситонов является туннелирование электронов из КТ на дефекты состояния в покрывающем структуру слое. При этом введение буферного слоя между массивом КТ и покрывающим слоем GaAs позволяет значительно улучшить оптические характеристики структуры и управлять ими. Исследовано также влияние нанесения на поверхность гетероструктуры с КТ тонкого слоя с частицами серебра, в том числе на туннелирование электронов.

Таким образом, в диссертации решен ряд связанных между собой задач и получены новые экспериментальные и теоретические результаты. Результаты моделирования с одной стороны базируются на полученных в результате независимого эксперимента данных, с другой стороны, хорошо описывают новые экспериментальные данные, что несомненно является **сильной стороной** диссертации. Сделанные на основании полученных результатов выводы значительно расширяют понимание свойств КТ на основе InGaAs и факторов, влияющих на локализацию носителей заряда в них. Такое понимание создает надежную основу для дальнейшей оптимизации КТ, необходимой для расширения их применений. Это обуславливает важное **прикладное значение** проведенных в диссертации исследований.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Во введении и в обзоре литературы в Главе 1 упомянуты только эпитаксиальные квантовые точки. Нет не только сравнения свойств, но даже и упоминания о существовании коллоидных квантовых точек, получаемых методами химического синтеза. Кажется, что для полноты картины такое обсуждение, хотя бы краткое, также необходимо. Кроме того, в настоящее время существуют также коллоидные квантовые точки со структурой ядро-оболочка на основе полупроводников АЗВ5, в том числе InAs. Интересно узнать, применимы ли к ним методы расчета упругих напряжений, обсуждаемые в диссертации.

2. При расчете энергии экситона учитывалась энергия кулоновского взаимодействия электрона и дырки. Однако в диссертации указано, что она бралась равной величине 20 мэВ для всех структур. Не понятно, откуда взялась такая оценка? Был ли сделан расчет в рамках теории возмущений с использованием найденных в работе волновых функций? Почему не учтена зависимость энергии взаимодействия от объема или формы КТ, например при построении зависимостей энергии экситона от отношения высоты и длины основания при разных объемах на рисунке 2.4? Такая зависимость может иметь место, так как энергия взаимодействия существенно зависит от перекрытия волновых функций.

3. В диссертации указано, что модель была верифицирована путем сравнения с расчетами в рамках 8-зонной модели из литературы. При этом не уточнялась, какие именно результаты сравнивались, а какие при этом являлись новыми по сравнению с представленными в литературе.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы в целом. Диссертация А.Н. Косарева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлены и решены задачи, важные для понимания механизмов локализации носителей заряда в КТ точках на основе InGaAs КТ и зависимости их свойств от геометрии и состава структуры, в том числе в гибридных структурах.

Достоверность и обоснованность результатов определяется применением современных экспериментальных методик и оборудования, корректной постановкой задач и выбором адекватных методов для их решения, согласием расчетов с результатами, известными из литературы, а также с экспериментальными данными. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 статьях в международных и российских научных журналах, доложены на 26 ведущих международных и российских научных конференциях. 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:

доктор физико-математических наук,
профессор РАН,
главный научный сотрудник лаборатории
спиновых и оптических явлений в полупроводниках,
ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Родина Анна Валерьевна

17.10.2023

Подпись Родиной А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе

к.ф.-м.н.

М.И. Патров

Контактные данные:

тел.: 7(921)6501352, e-mail: anna.rodina@mail.ioffe.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.10 – Физика полупроводников

Адрес места работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии
наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), Россия, 194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26

Тел.: +7 (812) 297-2245, Факс: +7 (812) 297-1017

Электронная почта: post@mail.ioffe.ru