



«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор НИЯУ МИФИ

д.ф.-м.н.

В.И. Шевченко

« 8 » сентября 2025 г.

Отзыв ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“» на диссертационную работу Клеммера Павла Сергеевича на тему «Использование явления резонансного туннелирования в фотоэлектрических преобразователях с квантовыми ямами», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния».

Актуальность темы диссертационного исследования.

Тема представленной диссертации — разработка фотовольтаических приборов — относится к физике полупроводников и полупроводниковых гетероструктур. Исследованная задача является важной и актуальной в связи с востребованностью эффективных источников энергии, использующих солнечное излучение, а также запросами по разработке новых оптоэлектронных приборов, учитывая современные успехи методов изготовления полупроводниковых квантоворазмерных структур. В настоящее время в области развития фотовольтаических преобразователей можно назвать несколько актуальных направлений:

1. повышение эффективности преобразования - в основном за счёт поиска новых полупроводниковых материалов и гетеропар и использования структур с несколькими переходами, а также подбора рабочего диапазона излучения;
2. понижение стоимости изготовления и эксплуатации, улучшение долговечности и устойчивости к дефектам изготовления.

3. оптимизация спектра поглощения для конкретной задачи (прибора) или получения желаемых характеристик, часто с использованием квантовых точек и гетероструктур.

Из перечисленных направлений, представленная диссертационная работа относится к первому и третьему. Представленная диссертационная работа занимает 107 страниц, содержит введение, обзор литературы, 3 содержательные главы и заключение. Библиография содержит 91 источник.

Анализ содержания работы и научных положений, выносимых на защиту.

В работе изучалась схема фотовольтаического преобразователя на базе $r-i-n$ структуры. Важную роль в эффективности конверсии излучения в ток играет скорость выноса фотоносителей в сплошной спектр, поэтому существует задача об оптимизации этого процесса при помощи подбора параметров структуры. Учитывая особенности процесса напыления гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), на практике удобнее использовать чередование слоёв с двумя фиксированными вариантами химического состава ($GaAs$ и $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$). Это породило идею, обсуждаемую в литературе, о добавлении в структуру тонких слоёв барьерного материала, которые останутся туннельно прозрачными и позволят контролируемо регулировать эффективную глубину ямы, наподобие широтно-импульсной модуляции в теории сигналов.

В Главе 1 были исследованы возможности данного метода для случая $r-i-n$ структуры $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$. Для этого решалось одночастичное уравнение Шрёдингера для электрона и дырки в исследуемых квантовых структурах. Далее на основе найденных волновых функций проводился расчёт коэффициента поглощения и темпа оптической генерации. Сравнение с экспериментальными спектрами фотолюминесценции для выращенных в Физическом институте им П.Н. Лебедева РАН структур показало в целом неплохое соответствие с расчетными значениями. В результате данного этапа была подтверждена возможность плавной перестройки спектра в квантовых ямах при помощи введения серий туннельно-прозрачных тонких барьеров без существенного нарушения оптических и туннельных характеристик.

Глава 2 посвящена уровням энергии экситонов в таких структурах. В данном случае потребовалось сформулировать расчетную схему для двухчастичного уравнения Шрёдингера. Был использован аналитический подход, используемый в научной литературе для решения подобных задач, переводящий 6-мерную задачу к 3-мерной, и реализована численная расчётная схема (достаточно трудоёмкая) для определения основного состояния экситона

в исследуемой структуре. Полученная зависимость энергии экситона от количества барьерных слоёв оказалась немонотонной: сначала возрастает, а потом убывает. Этот результат следует отметить. С одной стороны, как было показано в Главе 1 диссертации, повышение степени заполнения ямы тонкими барьерами позволяет монотонно и контролируемо смещать одночастичные уровни энергии. С другой стороны, кулоновское взаимодействие между электроном и дыркой в такой структуре существенно модифицируется - вначале усиливается за счёт частичной локализации волновой функции в отдельных ямах, а далее ослабевает после ослабления модуляции и обратной делокализации волновой функции. Эти явления подробно обсуждаются в тексте диссертации и демонстрируются соответствующими расчётными графиками. Данная часть работы существенна для понимания нетривиальных изменений энергетического спектра в таких структурах при внесении туннельно-прозрачных барьеров.

В Главе 3 представлена заключительная часть работы по исследованию эффективности выноса фотоносителей в изучаемых структурах, которая определяется их туннелированием между соседними ямами в условиях электрического потенциала p - i - n перехода. Для этого проводилось моделирование кинетики заполнения исследуемых уровней и расчёт фототока в структуре при помощи системы скоростных уравнений. Подбор расположения барьеров позволил обеспечить последовательное резонансного туннелирование между ямами. В итоге работы была разработана структура, обеспечивающая эффективный вынос в сплошной спектр сразу как для электронов, так и дырок.

Можно утверждать, что рассмотренная диссертация представляет итог законченной работы с ясными и обоснованными задачами, качественным и подробным теоретическим анализом, квалифицированно проведенным численным моделированием, а также подтвержденной сравнением с экспериментом.

Публикации и апробация результатов работы.

Основные положения работы, полученные результаты и выводы отражены в 4 печатных работах, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и проиндексированных в базах данных Web of Science и Scopus. Материалы диссертации докладывались на 5 международных конференциях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Полученные соискателем результаты могут быть использованы при разработке новых схем фотовольтаических преобразователей и оптоэлектронных приборов на основе р-і-п структур на предприятиях микроэлектроники и наукоемкого бизнеса.

Представленные в диссертации теоретические методы описания и расчёта параметров квантовой структуры с введенными тонкими туннельными барьерами могут быть включены в учебный процесс физических университетов по соответствующим предметам и программам обучения: физика твердого тела, физика полупроводниковых приборов, физика наноструктур, численные методы в квантовой физике. Среди конкретных кафедр, которые обучают по таким программам, можно назвать кафедру физики твердого тела и наносистем (№70) НИЯУ МИФИ, кафедру физики конденсированных сред (№67) НИЯУ МИФИ, кафедру полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ МИСиС, кафедру теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСиС, кафедру физики твердого тела НИУ МФТИ, Учебную лабораторию моделирования и проектирования электронных компонентов и устройств МИЭМ НИУ ВШЭ.

По работе имеются следующие замечания и пожелания:

1. Встречаются опечатки в тексте (страница 5 — "что подтверждается распределение единой волновой функцией"). Рисунок 1.4 плохо читается из-за малой яркости линий и недостаточного размера шрифта.
2. Использованная при исследовании экситонного спектра расчетная модель (Глава 2) может оказаться менее обоснованной в случае малой толщины туннельных слоев менее чем несколько атомов, когда уже нельзя говорить о сплошной среде и коэффициенте диэлектрической проницаемости.
3. В дальнейшем было бы интересно исследовать вопрос об устойчивости достигнутого резонанса при выносе фотоносителей из структуры в случае неоптимального напряжения между контактами, что, вероятно, окажется важным для практического использования таких структур в различных режимах и при различных уровнях освещения.

Данные замечания не снижают важность проведенной работы и полученных результатов.

Заключение:

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния», а также требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Автор диссертационной работы Клеммер Павел Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния» за новые результаты по улучшению характеристик фотоэлектрических преобразователей и разработку метода реализации резонансного согласования в последовательности квантовых ям посредством введения серии тонких туннельно-прозрачных барьеров заданной конфигурации.

Отзыв заслушан и обсуждён на заседании кафедры физики твердого тела и наносистем (№70) 29 августа 2025 г. (протокол №1) и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Отзыв подготовлен:

Доцент кафедры физики твердого тела
и наносистем (№70) НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н.

 П.Ф. Карцев

Заведующий кафедрой физики твердого тела
и наносистем (№70) НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., доцент

 М.М. Маслов

Директор института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ
д.ф.-м.н., профессор

 А.П. Кузнецов

Председатель Совета по аттестации и
подготовке научно-педагогических кадров
НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор

 Н.А. Кудряшов