

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации 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», и состоявшейся в НИТУ МИСИС 29 сентября 2025 года

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 23.06.2025, протокол № 30.

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Научный руководитель – Теленков Максим Павлович, к.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Лаборатория терагерцовой спектроскопии твердого тела, старший научный сотрудник; по совместительству доцент кафедры теоретической физики и квантовых технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 30 от 23.06.2025 г.) в составе:

1. Мухин Сергей Иванович – д.ф.-м.н, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС – председатель комиссии;
2. Ховайло Владимир Васильевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС;
3. Григорьев Павел Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС, с.н.с Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау (ИТФ РАН).
4. Панина Лариса Владимировна, д.ф.-м.н., профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ МИСИС.
5. Таперо Константин Иванович, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ МИСИС, заместитель гендиректора по науке и инновациям АО «Научно-исследовательский институт приборов» (ГК «Росатом»).

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“», г. Москва.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований в области резонансного туннелирования в фотоэлектрических преобразователях с квантовыми ямами получены следующие результаты:

1. Представлена методика конструирования резонансно-туннельных структур из квантовых ям, обеспечивающая эффективное извлечение носителей в непрерывный спектр благодаря резонансно-туннельным каналам выноса, как для электронов, так и для дырок. Методика основана на управлении уровнями размерного квантования

- посредством введения в квантовые ямы серии тонких туннельно-прозрачных барьеров определенной конфигурации.
2. Исследована кинетика фотогенерированных носителей заряда в резонансно-туннельных структурах с квантовыми ямами. Показано, что в таких структурах можно реализовать эффективный вынос фотогенерированных носителей заряда из квантовых ям в непрерывный спектр.
 3. Установлены зависимости фототока от темпа генерации, интенсивности рекомбинации и времени туннелирования электронов и дырок.
 4. Для реализации фотовольтаического преобразования в резонансно-туннельной структуре, встроенной в р-і-п элемент, необходимо одновременно обеспечить резонансно-туннельный транспорт как для электронов, так и для дырок.
 5. Проведено теоретическое исследование основного уровня энергии экситонов в квантовых ямах с тонкими барьерами. Получены зависимости энергии связи экситонов от количества и конфигурации введенных барьеров. Результаты расчетов получили экспериментальное подтверждение.
 6. Показано, что энергия связи экситонов немонотонным образом зависит от доли, занимаемой вводимыми барьерами в квантовой яме – сначала наблюдается рост, а затем падение энергии связи.

Теоретическая и практическая значимость подтверждена тем, что:

Представлена методика по управлению нижним уровнем размерного квантования в квантовых ямах в широком диапазоне - практически от дна квантовой ямы вплоть до уровня непрерывного спектра. Путем систематического исследования метода продемонстрирована возможность прецизионного управления положением подзоны в квантовых ямах путем введения серии туннельно-прозрачных барьеров заданной конфигурации. Продemonстрирована возможность управления степенью локализации волновых функций подзон в квантовой яме посредством изменения конфигурации распределения барьеров в объеме квантовой ямы. На основе методики разработаны модельные резонансно-туннельные структуры, состоящие из последовательности квантовых ям $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ с резонансным согласованием подзон, помещенные в р-і-п переход. Продemonстрирована возможность реализации на практике модельных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ на примере структур выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, реализующих исследуемый метод. Представленный метод инженерии состояний в квантовых ямах может быть использован для конструирования приборов оптоэлектроники, в частности, в фотовольтаических приложениях с квантовыми ямами.

Результаты проведенных исследований находятся в полном согласии с известными литературными данными и математическими моделями.

Методология работы основывается на комплексном применении численных методов расчета и моделирование резонансно-туннельных структур с квантовыми ямами, в которых управление уровнями размерного квантования достигалось посредством встраивания туннельно-прозрачных барьеров в объем квантовой ямы. Расчет кинетики фотостимулированного транспорта для резонансно-туннельных структур с квантовыми ямами проводился на основе балансных уравнений с дополнительным расчетом характерных времен туннелирования для квантовых ям. Проведено моделирование экситонных состояний и расчет энергии связи экситонов в квантовых ямах с внесенной серией тонких туннельно-прозрачных барьеров методом конечно-разностной дискретизации 2-го порядка.

Оценка достоверности результатов исследования

Достоверность научных результатов достигалась за счет комплексного подхода, включающего экспериментальную верификацию, теоретическое моделирование структур и сравнение с литературными данными для материалов GaAs и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Достоверность результатов обеспечена строгим контролем параметров структур GaAs и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, согласованностью теоретических моделей и полученных экспериментальных данных, статистической значимостью измерений и корреляцией с литературными источниками. Выявленные ограничения не ставят под сомнение основной вывод о повышении эффективности выноса фотоносителей из последовательности квантовых ям помещенных в p-i-n переход, путем резонансного согласования подзон в квантовых ямах реализующих наш подход.

Личный вклад соискателя

Автор проводил моделирование резонансно-туннельных структур с квантовыми ямами, в которых управление уровнями размерного квантования достигалось посредством встраивания туннельно-прозрачных барьеров в объём квантовой ямы. Автор проводил расчёт кинетики фотостимулированного транспорта для резонансно-туннельных структур с квантовыми ямами. Автор проводил моделирование экситонных состояний и проводил расчет энергии связи экситонов в квантовых ямах с внесенной серией тонких туннельно-прозрачных барьеров.

Основные публикации по теме исследования

Результаты работы опубликованы в 6 печатных работах в изданиях, 3 из них входящих в перечень ВАК РФ и в базы Web of Science/Scopus.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения ученых степеней соискателем учёной степени НИТУ МИСИС не нарушен.

Диссертация Клеммера Павла Сергеевича соответствует критериям, указанным в п. 2 Положения о порядке присуждения учёных степеней, принятых в НИТУ МИСИС, так как представленные в ней результаты и выводы, полученные на основании исследований автора, обладают научной новизной, носят фундаментальный характер, создают важную теоретическую и экспериментальную основу для практического использования явления резонансного туннелирования в фотоэлектрических преобразователях с квантовыми ямами.

Экспертная комиссия, учитывая актуальность, теоретический вклад и уровень научных результатов, пришла к решению о возможности присуждения Клеммеру Павлу Сергеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в составе 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Мухин Сергей Иванович

29.09.2025