

# ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

## на диссертацию

Клеммера Павла Сергеевича  
*ФИО аспиранта*

Использование явления резонансного туннелирования в  
фотовольтаических преобразователях с квантовыми ямами

*наименование темы научно-квалификационной работы*

**представленную к защите по направлению**

**1.3.8 Физика конденсированного состояния**

*(цифр и наименование направления) по направленности*

на ученую степень

**кандидат физико-математических наук**

Работа Клеммера Павла Сергеевича проходила в составе совместной научной группы кафедры Теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС и Лаборатории терагерцовой спектроскопии твердого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Диссертация Клеммер П.С. посвящена одному из направлений исследований группы – изучению фотопроводимости в резонансно-туннельных структурах из квантовых ям в электрическом поле р-і-n перехода.

Введение квантовых ям в і-область р-і-n перехода сдвигает красную границу межзонного поглощения в сторону больших длин волн, что представляет интерес для фотоэлектрических преобразователей, в том числе и солнечной энергии. Данный эффект растет по мере увеличения глубины квантовых ям. При этом возникает проблема эффективного извлечения фотогенерированных носителей заряда из глубоких квантовых ям в непрерывный спектр, поскольку традиционные методы термического возбуждения перестают быть эффективными.

Наша группа исследует возможность решения этой проблемы за счет использования явления резонансного туннелирования. Основная идея заключается в том, чтобы поместить в і-область последовательность квантовых ям, обеспечивающую резонансное выравнивание нижних подзон во всех квантовых ямах в электрическом поле р-і-n перехода. В этом случае носители заряда туннелируют из ямы в яму, постепенно приближаясь к непрерывному спектру. Достигнув последней ямы, они выходят в непрерывный спектр за счет термического возбуждения или туннелирования через последний барьер. Выполненные нами расчеты времен туннелирования показали, что извлечение фотоносителей может происходить за времена, существенно меньшие, чем времена рекомбинации, характерные для таких структур (M.P. Telenkov, Yu.A.

Mityagin. Bull. Lebedev Phys. Ins 40, (2013) 346 ).

Первостепенной задачей, возникающей здесь, является разработка методики конструирования таких резонансно-туннельных структур. Основная сложность заключается в том, что для того, чтобы компенсировать падение напряжения между соседними ямами в электрическом поле р-і-п перехода по всей структуре, необходимо варьировать нижний уровень энергии размерного квантования в широком диапазоне – вплоть до непрерывного спектра. Использование стандартных методов инженерии электронных уровней за счет изменения ширины и глубины квантовой ямы (ее состава) здесь сталкиваются с технологическими сложностями. Поэтому нами было предложено управлять положением уровней энергии в квантовой яме за счет введения в нее тонких туннельно-прозрачных барьеров. Расчеты и экспериментальные измерения (К.К. Nagaraja, М.Р. Telenkov, I.P. Kazakov, S.A. Savinov, Yu A. Mityagin. Materials Today 3 (2016) 2744) показали, что такой метод позволяет варьировать нижний уровень энергии в требуемом широком диапазоне. Однако такие исследования были проведены на ограниченном наборе структур, и задача о возможности конструирования данным методом требуемой последовательности квантовых ям оставалась все еще актуальной.

Данная актуальная задача решена в первой содержательной главе диссертации. В ней проведено систематическое исследование спектров носителей заряда при изменении конфигурации вводимых в квантовую яму барьеров – их числа, ширины и положения. Были выявлены общие тенденции поведения нижней подзоны размерного квантования и разработана методика, позволяющая конструировать требуемые последовательности квантовых ям.

Другой важной проблемой является необходимость эффективного извлечения наряду с фотоэлектронами также и фотодырок. Фотодырки туннелируют в направлении, противоположном направлению электронного транспорта. В результате происходит их накопление в крайней (самой глубокой) яме последовательности и рекомбинация с фотоэлектронами в яме и непрерывном спектре. Эта проблема является одной из ключевых для эффективности разрабатываемого подхода, поскольку квантовые ямы могут выступать в качестве ловушек для основного потока носителей заряда по непрерывному спектру, и, в результате, введение квантовых ям может даже привести к уменьшению эффективности преобразования.

В одной из наших первых статей по этому направлению (М.Р. Telenkov, Yu.A. Mityagin. Bull. Lebedev Phys. Ins 40, (2013) 346 ) была высказана идея о том, что данную проблему можно решить путем введения дополнительной резонансно-туннельной последовательности для фотодырок, аналогичной электронной.

Данная идея была развита в диссертации Клеммер П.С. Им были разработаны резонансно-туннельные структуры, одновременно обеспечивающие резонансно-туннельный канал как для электронов, так и для дырок. Проведенный в третьей содержательной главе диссертации анализ кинетики резонансно-туннельного транспорта в таких структурах в условиях оптического возбуждения показал перспективность разрабатываемого подхода для использования в р-і-п солнечных элементах. При этом была продемонстрирована принципиально важная роль резонансно-туннельного канала для дырок. Было установлено, что при уменьшении прозрачности дырочного канала, электронный фототок из квантовых ям также уменьшается, обращаясь в нуль при исчезновении канала для дырок, хотя при этом прозрачность электронного канала остается неизменной.

Используя технологические карты, разработанные Клеммером П.С, были выращены резонансно-туннельные структуры из квантовых ям в стандартном режиме молекулярно-лучевой эпитаксии. Проведенная рентгеновская электронно-микроскопическая характеристика структур показала толщину слоев практически совпадающей с технологически заданными.

В измеренных спектрах низкотемпературной фотолюминесценции таких структур были получены довольно узкие линии - с шириной существенно меньшей, чем требуемая точность выравнивания уровней в резонансно-туннельной структуре (величина теплового уширения уровней  $kT$  при комнатной температуре). Это, вместе с результатами рентгеновской характеристики, говорит о том, что, несмотря на достаточно большое число тонких слоев в яме и неизбежное возникновение шероховатости гетерограниц, технологически относительно легко может достигаться требуемая точность положения уровней.

При интерпретации данных фотолюминесценции возникла довольно непростая задача о расчете энергии связи экситонов в квантовой яме с введенными в нее тонкими барьерами. Сложность задачи состоит в том, что наличие тонких барьеров делает невозможным использование стандартных приближений для расчета экситонных спектров и требует прямого численного решения уравнения Шредингера для рассматриваемых структур.

Данная задача была решена Клеммером П.С. в третьей главе диссертации. Была рассчитана энергия связи экситона в квантовой яме с введенными барьерами. Обнаружена немонотонная зависимость энергии связи от доли квантовой ямы, занимаемой введенными барьерами. Показано, что эта зависимость обусловлена трансформацией волновых функций носителей заряда при введении в квантовую яму тонких барьеров.

Используя полученные данные, были рассчитаны энергии оптических переходов в спектре фотолюминесценции. Получено хорошее согласие с экспериментально измеренными спектрами.

Следует подчеркнуть, что несмотря на то, что энергия связи экситонов рассчитывалась для интерпретации спектров фотолюминесценции, полученные результаты сами по себе имеют фундаментальное значение, поскольку экситоны играют важную во многих оптических свойствах структур.

В ходе выполнения диссертационной работы Клеммер П.С. проявил хороший уровень знания общей физики и физики твердого тела, научился работать с новой для него информацией, приобрел компетенции, необходимые для постановки и решения научных задач, научился представлять результаты научной деятельности. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в двух статьях в журналах, входящих во второй и третий квартиль рейтинга Scopus, вошли в две статьи в трудах конференций, докладывались Клеммер П.С. на пяти международных конференциях, научных семинарах Отделения физики твердого тела ФИАН.

Клеммер П.С. внес существенный вклад в проведенные нашей группой исследования резонансно-туннельного транспорта фотовозбужденных носителей заряда в структурах из квантовых ям. Диссертация Клеммера П.С. подводит итог в теоретической проработке разрабатываемого подхода к увеличению эффективности фотовольтаических преобразователей. Полученные в ней результаты позволяют перейти к изготовлению р-і-п преобразователей, экспериментальному изучению и оптимизации их эффективности.

Считаю, что диссертация Клеммера П.С. заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Научный руководитель:

Теленков Максим Павлович  
к.ф.-м.н.,  
доцент каф. ТФиКТ НИТУ МИСИС

*Теленков*

Подпись

« 10 » апреля 2025 г.

