

**Достижения, полученные в 2021 году в рамках проектной части ГЗ
Минобрнауки РФ «Исследования оптических и транспортных свойств
туннельно-связанных наноструктур», (№ темы 0748-2020-0012, №
госрегистрации АААА-А20-120032590077-4)**

В 2021 году теоретические и экспериментальные исследования оптических и транспортных свойств туннельно – связанных наноструктур проводились в рамках коллаборации вновь созданной лаборатории «оптики туннельно – связанных наноструктур» на кафедре физики факультета информационных технологий и электроники Пензенского государственного университета и ЦКП при ИПЛИТ РАН (филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН) в соответствии с исследовательской программой, согласованной с ИПЛИТ РАН.

Основные результаты, полученные авторами Проекта в 2021 году:

- основным важным результатом этих исследований стало экспериментальное обнаружение *эффектов диссипативного туннелирования*, предсказанных ранее теоретически авторами проекта. В виду широких возможных приборных приложений в физике, химии, биологии и наномедицине на важность этих эффектов обращали внимание академик РАН А.И. Ларкин (ИТФ им. Л.Д. Ландау) и Нобелевский лауреат по физике 2003 года проф. Э.Дж. Леггет;

- экспериментально исследована зависимость фототока от напряжения обратного смещения на фотодиоде (на основе гетероструктур с вертикально туннельно - связанными двойными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001)) при монохроматическом фотовозбуждении квантовых точек на длине волны, соответствующей энергии оптического перехода между основными размерно-квантованными состояниями электронов и дырок в квантовые точки большего размера, а также зависимость от температуры, напряженности внешнего электрического поля и типа матрицы, в которой исследуемые структуры синтезировались. Экспериментально обнаружены три пика, связанных с диссипативным

туннелированием фотовозбужденных электронов между квантовыми точками большего и меньшего размера. Теоретически и экспериментально обосновано, что исследованные туннельные оптические переходы связаны с эффектами диссипативного туннелирования. Это важно для разработки фотодетекторов с управляемыми характеристиками;

- проведено исследование влияния дисперсии характерных размеров спиральных нанотрубок на макроскопические квантовые эффекты в продольном магнитном поле. Показано, что в реальных массивах нанотрубок, где существенную роль играет дисперсия их радиуса, возможен эффект подавления макроскопического квантового эффекта, связанного с ЭДС фотонного увлечения электронов в стоячей электромагнитной волне;

- показано, что из-за пространственного ограничения в квантовой яме в одном направлении имеет место усиление электронных корреляций в двухэлектронном примесном центре, что приводит к бо́льшим пороговым значениям второго потенциала ионизации, чем в квантовых точках и, как следствие, к более жестким условиям существования двухэлектронных примесных состояний. Также показано, что уменьшение влияния квантового размерного эффекта, сопровождающееся ростом электронной корреляции в многоямных квантовых структурах приводит к трансформации кривой поглощения, что выражается в увеличении провала между пиками двугорбого профиля спектральной кривой;

- показано, что влияние электрон-фононного взаимодействия на рекомбинационные процессы в примесном комплексе ($A^+ + e$) в сферически симметричной квантовой точке проявляется в температурном гашении спектральной интенсивности рекомбинационного излучения. Установлено, что эффект выхода на «плато» с ростом температуры является общим для разных механизмов фотолюминесценции;

- обоснована возможность существования канала температурного гашения люминесценции в полупроводниковых квазиуменьмерных структурах с примесными комплексами « $A^+ + e$ », связанного с диссипативным

туннелированием дырки в матрицу, окружающую квантовую точку. Показано, что этот канал эффективно «срабатывает» при температуре и напряженности внешнего электрического поля, при которых двухъямный осцилляторный потенциал, моделирующий систему «квантовая точка — окружающая матрица», становится симметричным (резонансный туннельный эффект);

- измерена диаграмма направленности импульсного ТГц излучения, генерируемого в кластерной струе аргона при возбуждении короткими лазерными импульсами большой интенсивности, фокусируемыми в различные участки кластерной струи;

- выполнено численное моделирование диаграммы направленности импульсного ТГц излучения, генерируемого в кластерной струе аргона при возбуждении короткими лазерными импульсами большой интенсивности, фокусируемыми в различные участки кластерной струи;

- продемонстрирована возможность использования исследуемого кристалла для преобразования фемтосекундного лазерного излучения из ближнего ИК диапазона в ТГц диапазон;

- показано, что дисперсионные свойства кристалла позволяют генерировать узкополосное ТГц излучение, спектральные свойства которого определяются условиями, близкими к фазовому синхронизму.

Возможные приборные приложения полученных в проекте результатов:

- результаты экспериментальных исследований фотоэлектрических свойств GaAs $p-i-n$ фотодиода с двойными асимметричными квантовыми точками InAs могут лечь в основу разработки кубитов для квантовых компьютеров, в которых квантовые вычисления основаны на спин-спиновом взаимодействии электронов, локализованных в квантовых точках;

- экспериментальные результаты проведенных ТГц исследований могут лечь в основу разработки источников и преобразователей терагерцового/ ИК излучения для применения в широком круге задач ТГц фотоники;

- развитая теория примесного поглощения света в квазиульмерных структурах с A^+ - и A_2^+ - центрами может быть использована при разработке детекторов инфракрасного излучения в субмиллиметровом диапазоне;
- результаты исследования примесного поглощения света в квантовых точках с примесными комплексами $A^+ + e$ и $A_2^+ + e$ могут быть использованы при разработке ИК - фотоприемников с управляемой чувствительностью;
- развитая теория фотодиэлектрического эффекта в квазиульмерных структурах, содержащих комплексы $A^+ + e$, может составить основу метода спектроскопических исследований примесей в полупроводниковых наноструктурах, а также бесконтактного метода регистрации инфракрасного излучения;
- развитая теория эффекта фотонного увлечения при внутризонных оптических переходах электронов в спиральной нанотрубке в продольном магнитном поле позволит исследовать новый класс макроскопических квантовых эффектов в нанотрубках с хиральной симметрией, связанных с асимметрией электрон-фотонного и электрон-фононного взаимодействий;
- развитая теория 1D- и 2D-диссипативного туннелирования с учетом влияния двух локальных фононных мод применительно к квантовым молекулам может быть использована при разработке туннельных диодов, туннельных транзисторов, фотоэлектрических сенсоров и других устройств, в которых реализуются контролируемые осцилляции туннельного тока;
- развитая теория внутрицентровых излучательных переходов в квантовых точках с управляемым временем жизни квазистационарных примесных состояний во внешнем электрическом поле может быть использована при разработке источников стимулированного излучения терагерцового диапазона частот;
- предложенная двухэлектронная модель примесного центра с учетом короткодействующего потенциала ядра в квантовой точке и развитая теория двойной фотоионизации двухэлектронных примесных центров в

квазиульмерных структурах могут быть использованы для разработки метода идентификации многозарядных примесных центров в полупроводниковых наноструктурах;

- развитая теория рекомбинационного излучения в квазиульмерных структурах с примесными комплексами $A^+ + e$ при наличии внешнего магнитного поля может быть использована при разработке источников стимулированного излучения на примесных переходах с управляемыми параметрами;

- развитая теория фотодиэлектрического эффекта в квазиульмерной структуре с примесными комплексами $A^+ + e$ при наличии внешнего магнитного поля может быть использована при разработке детекторов ИК-излучения с управляемыми параметрами, а также для разработки метода управляемого воздействия на процесс распространения субмиллиметровых волн в полупроводниковых наноструктурах.