

СОГЛАСОВАНО

Руководитель ИППИТ РАН –
филиала ФНИЦ «Кристаллография
и фотоники» РАН
д.ф.-м.н., профессор

А.П. Шкурин



УТВЕРЖДАЮ

Руководитель вновь создаваемой
лаборатории оптики
туннельно – связанных наноструктур
д.ф.-м.н., профессор

А.В. Шорохов

Декан ФПИТЭ ПГУ
д.ф.-м.н., профессор

В.Д. Кревчик

**Исследовательская программа вновь создаваемой лаборатории оптики туннельно -
связанных наноструктур
на базе кафедры физики Пензенского государственного университета**

Структура лаборатории:

1. Руководитель лаборатории, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор А.В. Шорохов (1976 г.р.),
НИУ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
2. Г.н.с., д.ф.-м.н., профессор В.Д. Кревчик (ПГУ)
3. Г.н.с., д.ф.-м.н., профессор М.Б. Семенов (ПГУ)
4. В.н.с., к.ф.-м.н., доцент А.В. Рудин (ПГУ)
5. В.н.с., к.т.н., доцент А.В. Задера (ПГУ)
6. Н.с., аспирант П.В. Кревчик (ПГУ)
7. Н.с., аспирант И.М. Мойко (ПГУ)
8. Лаборант – исследователь, студент Д.А. Сабурова (ПГУ)
9. Лаборант – исследователь, студент Т.П. Юртаева (ПГУ)
10. Лаборант – исследователь, студент И.М. Семенов (ПГУ)

Организация – исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет»

Наименование проекта: Исследования оптических и транспортных свойств туннельно – связанных наноструктур.

Наименование создаваемой в рамках исполнения проекта лаборатории: Лаборатория оптики туннельно – связанных наноструктур.

Вид научных исследований: Проведение фундаментальных научных исследований.

Период выполнения проекта: 2019 – 2023

Направление из Стратегии НТР РФ: Н1 Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта

Обоснование соответствия тематики проекта направлению из Стратегии НТР РФ:

Цель проекта: В данном проекте при изучении управляемости оптических и транспортных свойств наноструктур в условиях внешнего электрического поля при конечной температуре впервые предлагается использовать концептуальные представления и достижения в области диссипативного туннелирования и оптики наноструктур. Формирование квазиульмерных и квазидвумерных полупроводниковых (гетероструктур с вертикально – связанными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001)) и металлических квантовых точек (растущих золотых КТ в системе совмещенного АСМ/СТМ на начальном этапе их формирования, когда размер КТ не превосходит 10 нм) позволяет синтезировать новые материалы инновационных устройств нанoeлектроники с управляемыми характеристиками (т.е. отвечает указанному направлению из Стратегии НТР РФ). Синтез исследуемых структур планируется осуществить с консультациями и участием научных сотрудников ИПЛИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН; экспериментальные исследования синтезированных структур планируется частично осуществлять в ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, критическая технология: Указывается согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899) в случае, если тематика проекта может быть отнесена к одному из приоритетных направлений, а также может внести вклад в развитие критических технологий Российской Федерации. 2. Индустрия наносистем. 8. Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии.

Аннотация проекта:

В рамках данного совместного проекта с участием ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИПЛИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН предполагается разработка новых теоретических и экспериментальных подходов в исследовании туннельного транспорта и фотоэлектронных явлений в квазиульмерных и квазидвумерных твердотельных наноструктурах. Целью проекта является исследование особенностей оптических свойств квазиульмерных полупроводниковых структур, обусловленных примесными резонансными состояниями и диссипативным туннелированием во внешнем электрическом поле, а также туннельного транспорта в квантовых точках из коллоидного золота и в планарных квазидвумерных структурах, представляющих собой токую диэлектрическую пленку с синтезированными в ней Au – КТ.

Решение задачи проекта в части формирования системы металлических наночастиц (МНЧ) в сверхтонких диэлектрических плёнках позволит создавать системы МНЧ с контролируемой формой и геометрическими параметрами (с точностью ~ 1 нм), необходимыми для экспериментальных исследований фундаментальных процессов туннельного электронного транспорта. В таких системах будут отрабатываться теоретические модели диссипативного туннелирования и моделирования квантовых процессов на атомно-молекулярном уровне. Это позволит перевести зондовую нанотехнологию на качественно новый уровень, заложит физико- химические основы промышленной технологии для нанoeлектронных приборов нового поколения, и окажет существенное воздействие на развитие нанoeлектроники и наномедицины. Соответствие запланированных результатов мировому уровню исследований подтверждается их высокой оценкой Нобелевского лауреата по физике 2003, проф. Э. Дж. Леггетта (соавтора и редактора коллективной монографии совместно с основными исполнителями проекта проф. В.Д. Кревчиком и проф. М.Б. Семеновым: Кревчик В.Д., Овчинников Ю.Н., Леггет Э. Дж., Семенов М.Б. и др. Управляемое диссипативное туннелирование. Туннельный транспорт в низкоразмерных системах (коллективная монография, посвященная памяти академика РАН А.И. Ларкина, под редакцией Нобелевского

лауреата Э. Леггета, при редакционном участии В.Д. Кривичника, М.Б. Семенова, К. Ямамото и др.). – Москва, Изд-во: Физматлит, 2011-2012 г. 495 с.).

- В проекте в рамках коллаборации (*вновь создаваемой лаборатории оптики туннельно - связанных наноструктур* на базе кафедры физики Пензенского государственного университета с участием ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН) будут развиты методики формирования МНЧ (размерами 1-5 нм) и систем туннельно-связанных МНЧ в сверхтонких (толщиной ~5 нм) диэлектрических плёнках методом локального гальванического восстановления понов металла в слое геля при помощи зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) для целей создания устройств наноэлектроники с управляемыми характеристиками.

- Будут теоретически и экспериментально исследованы (в рамках коллаборации) синтезированные квазидвумерные структуры с золотыми КТ фиксированного размера (гексагональные, квадратные, треугольные), что может быть полезно в перспективе при разработке фотоэлектрических преобразователей, химических и биосенсоров.

- Будут теоретически и экспериментально исследованы (в рамках коллаборации) гетероструктуры InAs/GaAs(001) с двойными вертикально-связанными асимметричными квантовыми точками, что может найти практическое применение при разработке источников и преобразователей терагерцового / ИК излучения.

- Будет теоретически предсказан и экспериментально проверен эффект 2D – бифуркаций и квантовых биений двух типов (осцилляции и «квантовая гребенка») на туннельных ВАХ (будет проведено качественное сравнение с экспериментом для растущих КТ из коллоидного золота на начальном этапе их формирования, когда размер КТ не превышает 10 нм).

- Будут выявлены особенности спектров ФЛ, связанные с наличием резонансных пиков и осцилляций, обусловленных различными механизмами диссипативного туннелирования, а также наличие изломов, точек бифуркации и квантовых биений, обусловленных эффектами 2D – диссипативного туннелирования.

- Будет выявлен осциллирующий характер спектров межзонного оптического поглощения в туннельно-связанных КТ, а также осциллирующая зависимость вероятности межзонного оптического перехода от величины внешнего электрического поля при фиксированной частоте фотона. Ожидается ощутимое влияние параметров диссипативного туннелирования (температуры, частоты локальной фононной моды и константа взаимодействия с контактной средой) на форму спектральных кривых.

Исследовательская программа вновь создаваемой лаборатории оптики туннельно - связанных наноструктур на базе кафедры физики Пензенского государственного университета, согласованная с ФГБУ «Российская академия наук»:

2019 – теоретические исследования 2D – туннельных бифуркаций и квантовых биений в системе «пла кантилевера совмещенного АСМ/ СТМ – КТ(КМ)», моделируемой двухъямным осцилляторным потенциалом при наличии внешнего электрического поля при конечной температуре, в случае матрицы, обладающей свойствами метаматериала.

- Экспериментальные исследования квазидвумерных структур с золотыми квантовыми точками размером до 5 нм, синтезированных в диэлектрической матрице. Исследование этих структур планируется осуществить в ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН (отработка методик формирования НЧ Au в плёнках SiO₂ (TiO₂, ZrO₂) методом локального гальванического восстановления Au(III) в телесных плёнках при помощи АСМ зонда и синтез структур с использованием возможностей ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и

фотоника» РАН). Подобные структуры могут обладать свойствами метаматериала. *Планируется экспериментально подтвердить теоретически предсказанные эффекты управляемых двойных бифуркаций на туннельных ВАХ для таких структур в диэлектрической матрице, обладающих свойствами метаматериала.*

2020 – развитие теории 1D и 2D диссипативного туннелирования электрона в системе «игла кантилевера совмещенного АСМ/СТМ – КТ(КМ)», моделируемой двухъямным осцилляторным потенциалом при наличии внешнего электрического поля при конечной температуре в пределах слабой и сильной диссипации.

- Формирование квазиульмерных и квазидвумерных полупроводниковых наноструктур (гетероструктур с вертикально – туннельно связанными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001)). Экспериментальное исследование таких структур планируется осуществить в ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (синтез структур). Экспериментальное исследование фотопроводимости в таких структурах. *Планируется экспериментально проверить теоретически предсказанный эффект управляемого осциллирующего режима фотопроводимости в синтезированных гетероструктурах с вертикально – туннельно связанными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001).*

2021 – теоретическое исследование особенностей полевой зависимости ФЛ квазидвумерных гетероструктур, связанных с наличием резонансных пиков и осцилляций, обусловленных различными механизмами диссипативного туннелирования, а также наличие изломов, точек бифуркации и квантовых биений, обусловленных эффектами 2D – диссипативного туннелирования.

- Экспериментальное исследование полевой зависимости интенсивности ФЛ гетероструктур с вертикально – туннельно связанными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001) с использованием возможностей ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. *Планируется экспериментально подтвердить теоретически предсказанный эффект бифуркаций и квантовых биений на полевых зависимостях интенсивности ФЛ гетероструктур с вертикально – туннельно связанными самоформирующимися квантовыми точками InAs/GaAs(001).*

2022 – теоретическое исследование терагерцовой генерации планарных структур с массивами поверхностных КТ.

- Экспериментальное исследование планарных структур с массивами поверхностных КТ для целей терагерцовой нано-фотоники. Экспериментальное исследование таких структур планируется осуществить в ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (синтез структур). Планируется экспериментально исследовать спектры излучения с поверхности кремния в случае чистой поверхности и в случае нанесения туннельно – связанных наночастиц. *Планируется экспериментально подтвердить теоретически предсказанный эффект управляемой сдвиги в этих процессах частот первичного и вторичного ТГц фотонов.*

2023 – теоретическое исследование эффекта управляемого температурного гашения фотолюминесценции для квазиульмерных структур.

- Экспериментальное исследование фотолюминесценции для квазиульмерных структур с выращенными квантовыми точками ab-Si. Планируется осуществить в ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИППИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»

РАН (синтез таких структур методом лазерной абляции). Планируется экспериментально подтвердить теоретически предсказанный эффект управляемого температурного гашения фотолюминесценции для квазиуменьшенных структур с выращенными квантовыми точками *ab-Si*.

Вывод: В результате планируемых комплексных теоретических и экспериментальных исследований оптических и транспортных свойств туннельно – связанных наноструктур в рамках коллаборации вновь создаваемой лаборатории (оптики туннельно – связанных наноструктур) на базе кафедры физики Пензенского государственного университета с использованием ЦКП «Структурная диагностика материалов» ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН с консультациями и участием научных сотрудников ИИИИТ РАН – филиала ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН ожидается экспериментальное подтверждение ряда наблюдаемых фундаментальных макроскопических эффектов диссипативного туннелирования, на важность которых обратили внимание академик РАН А.И. Маркин (ИТФ им. Л.Д. Ландау) и Нобелевский лауреат по физике 2003 года проф. Э. Дж. Петтет.

Зав. кафедрой «Физика» ПГУ
д.ф.-м.н., профессор



М.Б. Семенов