

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной  
работе Университета ИТМО  
доктор технических наук,  
профессор



### Отзыв

ведущей организации Университет ИТМО на диссертацию Соловьева Ивана Александровича «Когерентная оптическая динамика экситонов и трионов в полупроводниковых квантовых ямах», представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

**Актуальность темы.** Благодаря значительному прогрессу в области технологий роста полупроводниковых наноструктур исследования изолированных резонансных экситонных особенностей стали играть главную роль в лазерной спектроскопии низкоразмерных полупроводников. При резонансном возбуждении экситонный ансамбль проявляет когерентную оптическую динамику, характер которой определяется механизмами энергетической и фазовой релаксации. Особый научный интерес представляет возможность управления экситонным состоянием когерентным образом с помощью лазерного возбуждения.

Наиболее развитой техникой исследования оптической когерентной динамики на сегодняшний день можно считать фотонное эхо, которое представляет собой частный случай нелинейного процесса четырехволнового смешения. Техника позволяет определить фундаментальные характеристики исследуемых систем – скорость энергетической релаксации и скорости обратимой и необратимой фазовой релаксации. Работа соискателя посвящена использованию методов двух- и трехимпульсного пикосекундного фотонного эха к изучению сверхбыстрой когерентной динамики экситонов и трионов в перспективных полупроводниковых наноструктурах на основе ZnO и GaN, а также развитию протокола спин-зависимого фотонного эха и его демонстрации на ансамбле нейтральных экситонов в квантовой яме InGaAs/GaAs.

Исходя из выше сказанного, диссертация соискателя посвящена изучению актуальных проблем современной экспериментальной физики конденсированного состояния.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 117 страниц, включая 48 рисунков. Список литературы содержит 225 наименований.

В **главе 1** дан подробный и логически выстроенный обзор литературы по экспериментальному исследованию сверхбыстрой динамики экситонов в наноструктурах различными методами.

**Глава 2** содержит теоретический формализм, используемый при моделировании эксперимента. Дано подробное описание экспериментальной установки по наблюдению сигнала четырехволнового смешения от неоднородно уширенного ансамбля экситонов с акцентом на особенности реализации оптического гетеродинамирования.

В главе 3 приведены результаты экспериментального исследования когерентных свойств экситонов и трионов в структуре с квантовыми ямами ZnO/(Zn,Mg)O. Проведено исследование образца с помощью спектроскопии фотолюминесценции и поглощения, найдены неоднородно уширенные оптические переходы экситонов  $X_A$ ,  $X_B$  и трионов  $T_A$ ,  $T_B$ . Зафиксирован сигнал фотонного эха на всех упомянутых переходах. Из эксперимента по кинетике затухания амплитуды первичного и стимулированного фотонного эха со спектральным разрешением были определены время когерентности  $T_2$ , время энергетической релаксации  $T_1$ . С помощью температурных измерений выделен вклад экситон-фононного рассеяния в скорость дефазировки трионов  $T_A$ .

Глава 4 посвящена применению спектроскопии фотонного эха к исследованию локализованных экситонов в структуре с квантовыми ямами (In,Ga)N/GaN. Был обнаружен и исследован сигнал двух- и трехимпульсного фотонного эха от экситонов в ультрафиолетовой спектральной области в пикосекундном диапазоне времен. Определены зависимости времен  $T_1$  и  $T_2$  в области неоднородного уширенного экситонного перехода, как функция степени локализации частиц. Проведены температурные исследования когерентной динамики, проявившие нелинейный рост скорости чистой фазовой релаксации при слабо меняющейся скорости энергетической релаксации.

Глава 5 посвящена развитию протокола спин-зависимого фотонного эха и его применению к системе экситонов в одиночной квантовой яме InGaAs/GaAs. Была измерена кинетика затухания сигнала, как функция амплитуды поперечного магнитного поля в геометрии Фохта в диапазоне  $0 \div 6$  Т в различных поляризационных конфигурациях возбуждения-детектирования. Обнаружены осцилляции сигнала, предсказанные пятиуровневой моделью экситона с тяжелой дыркой в магнитном поле. Исследован критический режим, при котором определено время  $T_2$  для темных экситонов. Приведены оценки для электронного и дырочного  $g$ -фактора, величины неоднородного разброса и константы обменного взаимодействия.

**Заключение** содержит краткие итоги проведенной работы.

**Научная новизна.** В ходе проведения экспериментальной исследовательской работы соискателю удалось получить ряд новых научных результатов, из которых можно выделить следующие:

1. Показано, что применение техники двух- и трехимпульсного фотонного эха с использованием узко-спектральных лазерных импульсов позволяет выделить вклады различных механизмов в фазовую и энергетическую релаксацию ансамбля экситонов и трионов даже при наличии большого неоднородного уширения.

2. Экспериментально продемонстрирована разница в характере динамики экситонов и трионов двух типов А и В в структуре с квантовыми ямами ZnO/(Zn,Mg)O.

3. Установлено, что локализованные экситоны в периодической структуре со ста квантовыми ямами (In,Ga)N/GaN сохраняют оптическую когерентность на временах сотен пикосекунд, а время  $T_1$  достигает 1 нс.

4. Продемонстрировано возникновение осцилляций в сигнале спин-зависимого двухимпульсного фотонного эха от ансамбля экситонов в тонкой квантовой яме (In,Ga)As/GaAs при приложении внешнего поперечного магнитного поля. Представлено объяснение наблюдаемых осцилляций с Ларморовской прецессией экситонного спина; а разработанная теоретическая модель корректно описывает экспериментальные данные.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Выводы диссертации и вынесенные на защиту положения обоснованы и являются важными для современной экспериментальной физики конденсированного состояния. Результаты были опубликованы в 5 научных статьях, 4 из которых опубликованы в научных журналах

первого квартиля (Q1). Согласованность теоретического моделирования с экспериментальными результатами, а также соответствие между приведенными выводами и опубликованными ранее работами подтверждает достоверность результатов. Кроме того, достоверность результатов обеспечена применением зарекомендовавшими себя экспериментальными методиками первичного и стимулированного фотонного эха и техники оптического гетеродинамирования.

**Практическая значимость.** Результаты диссертации представляют собой фундаментальный интерес с точки зрения исследования процессов сверхбыстрой релаксации экситонных состояний. Успешная реализация когерентного контроля может быть полезна для обработки классической и квантовой информации полностью оптическим способом. Предложенный в работе метод перевода экситонной когерентности в темное состояние с помощью поперечного магнитного поля позволяет значительно увеличить время  $T_2$ , необходимое для перспективных устройств информационной фотоники.

**Рекомендации по использованию результатов работы.** Полученные в диссертации результаты представляют научный интерес для специалистов в области нанофотоники, сверхбыстрой спектроскопии, а также физики конденсированного состояния. Диссертация может быть использована в качестве методического пособия для студентов и аспирантов по направлениям «Физика конденсированного состояния», «Оптика», «Физика».

В ходе обсуждения научного доклада И.А. Соловьева были заданы **следующие вопросы:**

1. В главе 3, экситонные и трионные состояния А и В проявляются в виде уширенных линий в спектре поглощения, что может приводить к перекрытию сигналов фотонного эха при исследовании динамики релаксации этих состояний. Учитывается ли такой эффект при обработке экспериментальных данных и насколько он существенен?

2. В главе 3, измеренные значения времени дефазировки трионов существенно превышают аналогичные значения для экситонов. Какими физическими механизмами это обусловлено?

3. В главе 5 делается предположение о ключевой роли темного экситонного состояния в описании результатов эксперимента по спин-зависимому фотонному эху. Насколько обосновано такое предположение? Возможно ли напрямую измерить темное состояние и проводились ли подобные эксперименты в данной работе или в других работах?

**В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:**

1. В диссертации сказано, что экситоны локализованы в квантовых ямах (In,Ga)N/GaN вследствие чего увеличено время фазовой и энергетической релаксации экситонов. Обычно локализацию экситонов устанавливают путем измерения времен релаксации. Не до конца ясно каким именно образом был установлен факт сильной локализации экситонов в квантовых ямах (In,Ga)N/GaN.

2. На некоторых графиках в диссертации возбуждающий сигнал и фотонное эхо показаны в одном масштабе по амплитуде. Такое представление неудачно, поскольку амплитуда эхо-отклика существенно меньше возбуждающего сигнала.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на 4 международных научных конференциях, а также были представлены на трех научных семинарах лаборатории оптики спина им. И. Н. Уральцева СПбГУ.

**Заключение.** Диссертационная работа Соловьева Ивана Александровича на тему «Когерентная оптическая динамика экситонов и трионов в полупроводниковых квантовых ямах» представляет собой законченную научную работу, выполненную на

высоком уровне и имеющую значение для развития соответствующей отрасли знаний. Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» согласно номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени (Приказ Минобрнауки России от 24.02.2021 №118).

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук соискателем ученой степени не установлено.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», и ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Доклад Соловьева Ивана Александровича по материалам диссертации был заслушан и обсуждался на заседании комиссии по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» Университета ИТМО (протокол № 6 от 24.11.2023 г.). На заседании присутствовало 15 человек. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Отзыв ведущей организации подготовил:

кандидат физико-математических наук,  
доцент Института перспективных систем  
передачи данных  
Университета ИТМО  
Тел.: +7 (812) 480-0835  
e-mail: andrei.smirnov@niuitmo.ru



Смирнов  
Андрей Михайлович

Председатель заседания:

доктор физико-математических наук,  
профессор, директор Института  
перспективных систем передачи данных  
Университета ИТМО



Романов  
Алексей Евгеньевич

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.  
Тел.: +7(812)480-00-00  
e-mail: od@itmo.ru