

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 530.145, 535.14

МИХАЛЫЧЕВ
Александр Борисович

**КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ И
СОЗДАНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Минск 2023

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Научный консультант: **Могилевцев Дмитрий Сергеевич**,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент, заместитель заведующего
центром «Квантовая оптика и квантовая информатика» Института физики НАН Беларуси

Официальные оппоненты: **Барышевский Владимир Григорьевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории физики
высоких плотностей энергии Института ядерных
проблем Белорусского государственного
университета

Печень Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий отделом математических методов
квантовых технологий Математического института
им. В.А. Стеклова Российской академии наук;

Семченко Игорь Валентинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заместитель генерального директора по научной
деятельности ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и
лазерная техника» Национальной академии наук
Беларуси

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится “16” июня 2023 г. в 15:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2, тел. 270–80–59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН Беларуси

Автореферат разослан “13” мая 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
физико-математических наук

Выблый Ю.П.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие квантовой информатики — разработка квантовых компьютеров, систем квантовой коммуникации, квантовых сенсоров — вызвало значительное усиление интереса к теории квантовых измерений. В сравнении с классическим, квантовое измерение обладает рядом принципиальных особенностей и занимает особое место в аксиоматике квантовой механики. Во-первых, квантовое измерение оказывает неизбежное влияние на состояние исследуемой системы, редуцируя его в зависимости от получаемого результата. Именно это свойство приводит к невозможности приготовления квантового состояния, в котором все наблюдаемые величины имели бы определенные значения. Во-вторых, теорема о запрете квантового клонирования не позволяет, проводя измерения над одиночным квантовым объектом, получить полную информацию о его состоянии и создать точную копию. Таким образом, квантовая информация носит *скрытый* характер и требует специальных процедур для извлечения и использования.

Особенности квантовых состояний и измерений не только усложняют процедуру получения и анализа информации о квантовых объектах, но и предоставляют ряд новых уникальных возможностей. Внутренняя случайность квантовых систем позволяет создавать квантовые генераторы случайных чисел, безопасность которых основывается на фундаментальных законах физики, а не особенностях алгоритмов. Скрытый характер квантовой информации активно используется в квантовой криптографии и является основой ее секретности. Сложная структура пространства состояний квантовых систем обеспечивает их высокую чувствительность к внешним воздействиям, что является предметом изучения квантовой метрологии и микроскопии. Неизбежное влияние измерительного процесса на исследуемое квантовое состояние не всегда является нежелательным явлением и может использоваться для целенаправленного управления состояниями квантовых объектов.

В настоящей работе процесс квантового измерения рассматривается с точки зрения двух направлений его практического использования: извлечения информации, содержащейся в состоянии измеряемого квантового объекта и характеризующей в том числе его предшествующее взаимодействие с другими объектами, а также целенаправленного изменения такого состояния. Разработанные при этом подходы позволяют решить следующие типы задач:

- выбор оптимальной стратегии квантовых измерений для наиболее эффективного извлечения информации о неизвестном квантовом состоянии;
- создание и усиление неклассических свойств квантово-оптических состояний, включая квантовую перепутанность;
- преодоление классических пределов чувствительности при использо-

вании квантовых состояний–зондов.

Для решения данных задач в диссертации разработан ряд специальных методов: вероятностное управление квантовыми состояниями с помощью *исключающих измерений*, целенаправленное *конструирование взаимодействия открытых квантовых систем* с резервуарами, а также метод *паттернов данных* в применении к задачам квантовой томографии, микроскопии, конструирования и эмуляции квантовых состояний.

Вероятностное преобразование квантовых состояний в процессе измерения может использоваться для решения целого ряда квантово-информационных задач: получения целевых неклассических состояний поля, включая перепутанные, создания квантовых логических элементов, осуществления квантовой телепортации. Большинство исследований, проводимых в данном направлении, не являются универсальными и нацелены на осуществление конкретного преобразования квантовых состояний. При этом методы, обладающие универсальностью, требуют наличия сложной с практической точки зрения измерительной установки. В главе 2 диссертации представлен разработанный соискателем универсальный подход, основанный на линейной оптической измерительной схеме и обеспечивающий вероятностное усиление квантовой перепутанности и иных неклассических свойств квантово-оптических состояний. Унифицированное операторное описание так называемых «исключающих» измерений позволяет адаптировать данный метод к различным задачам: эффективному приготовлению перепутанных состояний оптических кубитов и кутритов; созданию фоковских состояний и их суперпозиций, — а также корректно учесть влияние шумов и воздействия окружения на систему.

Взаимодействие квантовой системы с окружением, как и активное измерение, приводит к неунитарному преобразованию ее состояния и может использоваться для создания и усиления неклассических свойств. Тесная связь между неунитарной динамикой и непрерывными квантовыми измерениями позволяет перенести идеи вероятностного преобразования состояний на конструирование взаимодействия открытых квантовых систем с резервуарами для управления квантовыми состояниями. Представленное в главе 3 последовательное математическое описание неунитарных процессов в нелинейных волноводах и одноатомном лазере обеспечило простоту анализа их динамики и возможность оптимизации параметров взаимодействия для получения наиболее ярко выраженных неклассических свойств результирующих состояний. К числу состояний, генерация которых возможна с помощью разработанных в диссертации методов, принадлежат оптические состояния «кота Шредингера» (суперпозиции когерентных состояний), фотонные пары и субпуассоновские состояния. Все перечисленные состояния представляют важный ресурс

для квантовой коммуникации, повышения точности измерений в квантовой метрологии и микроскопии, а также других задач, связанных с квантовой обработкой информации.

Сложность процедур создания квантовых состояний приводит к необходимости оценки соответствия создаваемых состояний ожидаемым свойствам. Такая задача решается в рамках квантовой томографии. Наряду со сложностями, накладываемыми фундаментальными свойствами квантовых измерений, на пути к успешной диагностике полученного квантового состояния встает также проблема систематических погрешностей и необходимости калибровки измерительной аппаратуры. Для решения данной проблемы был предложен метод паттернов данных, позволяющий заменить процедуру калибровки детекторов на использование источника заданных пробных квантовых состояний и основывающийся на линейности квантовой механики. В главе 4 представлено развитие данного метода соискателем. Предложена адаптивная методика измерения, учитывающая полученную информацию об объекте для дальнейшего выбора наиболее информативных измерений и позволяющая снизить число копий квантового состояния, требуемых для его успешной томографии, в несколько раз по сравнению с использовавшимися ранее подходами. Универсальность метода паттернов данных позволила применить его и к задачам, обратным квантовой томографии: к конструированию состояния массива излучателей (квантовой антенны) для обеспечения заданной пространственной структуры излучаемого поля и к эмуляции известных, но недоступных на практике квантовых состояний с использованием их разложения по классическим (когерентным) пробным состояниям.

Дальнейшее обобщение метода паттернов данных позволило также применить его к задаче квантовой микроскопии, описанной в главе 5 диссертации. Использование квантово-коррелированных состояний, включая состояния, методы генерации которых предложены в главах 2 и 3, позволяет преодолеть классический дифракционный предел и обеспечить сверхразрешение. Несмотря на существенный прогресс в развитии сверхразрешающих методов микроскопии, до недавнего времени существовал значительный разрыв между простыми модельными задачами, исследуемыми теоретически, и реальными объектами, наблюдаемыми экспериментально. В диссертации представлены результаты, нацеленные на устранение данного разрыва: проведен информационный анализ многопараметрической задачи реконструкции реальных объектов, предложен эффективный метод восстановления амплитуды пропускания таких объектов по измеренным корреляционным изображениям, а также введена количественная мера оптического разрешения на основе информации Фишера. Эффективность предложенных подходов была успешно подтверждена при их применении к реальным экспериментальным данным,

а также позволила разработать новый метод повышения оптического разрешения с помощью вероятностного управления состоянием поля в квантовой микроскопии.

Разработанные подходы также важны с методологической точки зрения благодаря своей общности и универсальности. В главе 6 представлены результаты применения разработанных в диссертации квантовых методов для решения ряда задач классической физики. Операторный подход, использованный для описания «исключающих» измерений и диссипативной динамики, оказался эффективен для моделирования инструментальной функции рентгеновского дифрактометра, обеспечив многократное ускорение по сравнению с существующими аналогами. Байесовский подход, развитый для задач квантовой томографии, успешно применен и для распознавания сложных паттернов в спектрах рентгеновской дифракции и ионной масс-спектрометрии. Методы анализа и оптимизации измерений на основе информации Фишера были перенесены из квантовой микроскопии на рентгено-дифракционные измерения, где никогда ранее не применялись, и продемонстрировали значительную эффективность. Полученные результаты позволяют предположить целесообразность и других междисциплинарных применений разработанных подходов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами. Настоящая работа выполнялась в рамках темы «Разработка технологий создания элементов информационно-управляющих систем космических средств» Государственной программы фундаментальных научных исследований «Поля и частицы» (задание «Поля и частицы 10», 2006-2010 гг., № госрегистрации 20063832); темы «Исследование квантовой корреляции составных систем различной размерности» Научно-технической программы Союзного государства «Разработка нанотехнологий создания материалов, устройств и систем космической техники и их адаптация к другим отраслям техники и массовому производству» (НИР 2.2.1/259, 2009-2012 гг., № госрегистрации 20093636); темы «Разработка системы квантовой криптографии через открытое пространство для спутниковых систем коммуникации» Государственной комплексной программы научных исследований «Космические исследования» (задание «Космические исследования 14», 2010-2012 гг., № госрегистрации 20110292); проекта БРФФИ Ф10МЛД-023 «Одно- и двухквантовые кооперативные эффекты в резонаторной КЭД для квантовых вычислений» (х/д 418, 2010-2012 гг., № госрегистрации 20102242); НИР «Способ

создания перепутанного состояния на больших расстояниях с использованием малой кросс-керровской нелинейности» (шифр «Квантком», х/д 521, 2011 г., № госрегистрации 20110565); проекта 6-й рамочной программы EQUIND «Сконструированная квантовая информация в наноструктурированном алмазе» (х/д 922, 2007-2010 гг., № госрегистрации 20071241); проекта БРФФИ Ф11АРМ-020 «Нелинейное Ландау-Зинеровское туннелирование» (х/д 651, 2011-2013 гг., № госрегистрации 20114011); проекта БРФФИ Ф10Р-123 «Исследование многомодовых состояний одиночных фотонов и фотонных пар с целью использования в задачах квантовой информатики и квантовой связи» (х/д 426, 2010-2012 гг., № госрегистрации 20102248); задания 3.1.02 «Разработка и исследование квантово-информационных моделей, систем и устройств для целей квантовой криптографии, магнетометрии, метрологии, создания элементной базы квантовых компьютеров и симуляторов, генераторов случайных чисел, высокочувствительных детекторов» ГПНИ «Конвергенция» (шифр «Конвергенция 3.1.02», 2011-2015 гг., № госрегистрации 20111993); задания 3.4.01 «Создание и использование национальной вычислительной дизайн-платформы моделирования и симуляции систем на атомно-молекулярном и наноструктурном уровнях, включая квантово-химические, электродинамические, электромеханические, квантово-оптические, молекулярно-динамические методы, для обеспечения исследований и разработок интегрированных атомно-молекулярных и наноструктурированных устройств и технологий следующего поколения» ГПНИ «Конвергенция» (шифр «Конвергенция 3.4.01», 2011-2015 гг., № госрегистрации 20120290); международного проекта «Исследование методов генерации и измерения квантовых оптических полей для квантово-информационных приложений», в рамках сотрудничества с Объединенным институтом ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация (шифр «Кубит-2», х/д 433, 2015 г., № госрегистрации 20151926); проекта БРФФИ Ф16КОР2-001 «Квантовые корреляции в параметрическом рассеянии света для задач квантовой информатики» (х/д 517, 2016-2017 гг., № госрегистрации 20160775); международного проекта 7-ой рамочной программы Евросоюза по научным исследованиям и инновациям «Горизонт 2020» «Микроскопия сверхвысокого разрешения на перепутанных состояниях фотонов» (шифр «SUPERTWIN», х/д 527, 2016-2019 гг., № госрегистрации 20162218); задания 3.1 «Разработка и исследование квантово-информационных моделей, систем и устройств для целей квантовой метрологии, магнетометрии, криптографии, создания элементной базы квантовых компьютеров и симуляторов, генераторов случайных чисел, высокочувствительных детекторов оптических полей» ГПНИ «Конвергенция-2020» (шифр «Конвергенция 3.1», 2016-2020 гг., № госрегистрации 20160085); задания 3.8 «Разработать и апробировать методы моде-

лирования сложных систем и процессов для развития бионанотехнологий» ГПНИ «Конвергенция-2020» (шифр «Конвергенция 3.8», 2016-2020 гг., № госрегистрации 20160087); проекта БРФФИ Ф18У-006 «Квантовые корреляции как средство для улучшения разрешения при квантовой реконструкции изображения» (х/д 115, 2018-2020 гг., № госрегистрации 20181330); международного проекта 7-й рамочной программы Евросоюза по научным исследованиям и инновациям «Горизонт 2020» «Субпуассоновский фотонный генератор на основе когерентной диффузной фотоники» (шифр «PhoG», х/д 170, 2018-2021 гг., № госрегистрации 20190008); задания 49 «Разработать и изготовить научно-учебный электронно-оптический и виртуальный комплексы по квантовой оптике и квантовой информатике» ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» («Эталон и научные приборы»), подпрограммы «Разработать и изготовить научно-учебные комплексы и оборудование» («Научно-учебное оборудование») (х/д 84.49, 2019-2020 гг., № госрегистрации 20193094); НИР «Информационный анализ проблемы квантовой визуализации» (соглашение о совместных исследованиях 4264.01 с Научно-технологическим университетом имени короля Абдаллы, Саудовская Аравия; х/д 435, 2020 г., № госрегистрации 20201617); проекта БРФФИ Ф20КИ-035 «Сравнение меры неклассичности одномодового полевого состояния, основанной на чувствительности к упорядочиванию полевых операторов, с другими мерами неклассичности» (х/д 286, 2020-2021 гг., № госрегистрации 20200514); задания «Разработать и изготовить быстродействующий генератор случайных бит на основе поляризационных шумов в лазере с вертикальным резонатором» ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», подпрограммы «Оборудование для перспективных научных исследований» (шифр «УНО 1.19», 2021-2022 гг., № госрегистрации 20210073).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, в частности пункту «Физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные)» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы.

Диссертация соответствует пункту «Квантовая механика. Квантовая теория информации и квантовые вычисления» паспорта специальности «01.04.02 — Теоретическая физика».

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка методов использования квантовых измерений для управления квантовыми состояниями оптических полей и получения информации о таких

состояниях при осуществлении квантовой томографии, метрологии и микроскопии. Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1. Разработать метод вероятностного управления квантово-оптическими состояниями путем измерения и построить операторное описание сопутствующих преобразований квантовых состояний.

2. Определить условия эффективной генерации неклассических и перепутанных состояний при неунитарном управлении квантовыми состояниями в «фотонной пушке» на основе связанных нелинейных волноводов и одноатомном лазере.

3. Обобщить и оптимизировать метод паттернов данных для повышения эффективности создания, реконструкции и эмуляции квантовых состояний.

4. Разработать информационный подход к анализу, оптимизации и количественному описанию оптического разрешения в квантовой микроскопии.

5. Обобщить разработанные методы описания и оптимизации квантовых измерений на обработку результатов классических измерений рентгеновской дифрактометрии и ионной масс-спектрометрии.

Объектом исследования являются оптические поля и проводимые над ними квантовые измерения, обеспечивающие преобразование состояния полей либо получение информации об их состоянии или свойствах освещаемых ими объектов.

Предметом исследования являются информационные аспекты квантовых измерений, проводимых над оптическими полями, преобразование квантовых состояний в процессе измерения и оптимизация квантовых состояний и последовательности измерений для получения максимального количества информации об исследуемых объектах.

Научная новизна. Все результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, являются новыми.

Введен новый класс «исключающих» измерений и на его основе предложен универсальный метод создания неклассических квантово-оптических состояний, включая перепутанные, с использованием нелинейной модуляции фазы в керровской среде, линейной оптики и детекторов, не разрешающих число фотонов. Подходы, предложенные в предшествующих работах, не обладали универсальностью либо требовали более сложных измерительных схем.

Впервые представлено обобщение методов когерентной диффузионной фотоники на нелинейный режим для создания «фотонной пушки» — детерминистического генератора неклассических (в том числе субпуассоновских) состояний света. Использование неунитарного управления состояниями обеспечивает защиту генерируемых неклассических свойств от разрушения, отличающую данный подход от методов на основе унитарной динамики.

Впервые проведен последовательный анализ динамики одноатомного

лазера с некогерентной накачкой в терминах распределений квазивероятностей и представлено количественное описание неклассических свойств полевых состояний, генерируемых в различных режимах его работы.

Впервые проведена подробная оптимизация метода квантовой томографии паттернов данных: представлены выбор оптимального набора пробных состояний для типичных ситуаций и адаптивный метод, обеспечивающий оптимальную последовательность измерений для заданного (заранее неизвестного) квантового состояния. В предыдущих работах вопросы оптимизации выбора пробных состояний и проводимых измерений не рассматривались.

Впервые предложена идея классической эмуляции квантовых экспериментов, основанная на применении метода паттернов данных для разложения недоступного квантового состояния по доступным классическим состояниям и последующего воспроизведения результатов произвольного квантового измерения.

Разработан новый метод конструирования состояний квантовой антенны методом паттернов данных для управления локализацией излучаемых фотонов и создания квантовых корреляций. В предыдущих работах квантовые особенности полей, излучаемых квантовыми антеннами, рассматривались для некоторых специальных модельных начальных состояний, выбранных заранее без привязки к геометрии конкретной антенны и оптимизации.

Впервые проведен теоретико-информационный анализ многопараметрической задачи квантовой микроскопии: реконструкции функции пропускания реальных объектов на основе корреляционных функций проходящего через них излучения. Предложен итеративный алгоритм реконструкции для протяженных объектов, обеспечивающий линейное масштабирование времени расчета с размером объекта. Введено операциональное определение оптического разрешения на основе информации Фишера. Обнаружен эффект повышения разрешения при наличии физических ограничений, накладываемых на параметры изучаемого объекта. Ранее подробный теоретический анализ проводился только для простых модельных объектов, описываемых малым числом параметров и не требующих вычислительно сложной процедуры реконструкции; информационное содержание измеренных корреляционных изображений реальных протяженных объектов не изучалось.

Предложен новый метод вероятностного повышения разрешения в квантовой микроскопии за счет увеличения чувствительности перепутанного оптического состояния при детектировании одного из фотонов.

Разработан метод расчета инструментальной функции рентгеновского дифрактометра, одновременно обеспечивающий универсальность (применимость к произвольной конфигурации), корректный анализ распространения излучения в трехмерном пространстве и высокую скорость расчета. Каждый

из предшествующих методов обладал как минимум одним из недостатков: использованием более грубых приближений при описании излучения, рассмотрением только фиксированной простой конфигурации или большим временем расчета и использованием упрощенных моделей при попытке построить универсальный подход.

Разработан и впервые применен в масс-спектрометрии и рентгеновской порошковой дифрактометрии новый байесовский подход к идентификации спектральных паттернов, обеспечивающий эффективный анализ измеренных данных из первых принципов. Традиционные подходы к выделению паттернов основываются на постулировании критериев сравнения спектров из интуитивных соображений. Современные более точные и обоснованные методы используют вычислительно сложное моделирование полных спектров и не обеспечивают приемлемую для практических целей скорость анализа.

Впервые разработан автоматизированный универсальный метод планирования и оптимизации экспериментов в рентгеновской дифрактометрии на основе расчета и максимизации информации Фишера. Ранее выбор измерительных параметров в данной области осуществлялся вручную или включал простую оптимизацию конкретных измерений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Класс «исключающих» квантово-оптических измерений позволяет осуществить вероятностное управление квантовыми состояниями, выделяющее целевые неклассические компоненты состояний путем подавления вклада классических компонент. Измерения, исключаящие набор когерентных состояний, при использовании совместно со слабой перекрестной модуляцией фазы в керровской среде обеспечивают создание фоковских состояний, их суперпозиций, а также перепутанных оптических состояний.

2. Конструирование и оптимизация неунитарной динамики в открытых квантовых системах обеспечивает создание неклассических и перепутанных квантово-оптических состояний: субпуассоновских и бифотонных состояний в цепочке связанных нелинейных волноводов, а также суперпозиционных однофотонных и перепутанных атомно-полевых состояний в одноатомном лазере с некогерентной накачкой.

3. Универсальность связи между квантовым состоянием, его представлением в виде смеси неортогональных базисных состояний и результатами квантовых измерений над перечисленными состояниями позволяет обобщить метод паттернов данных и обеспечить проведение оптимальной адаптивной томографии квантовых состояний на основе байесовской оценки вероятностей, классическую эмуляцию квантовых экспериментов и управление пространственной локализацией и корреляционными свойствами поля, излучаемого квантовой антенной.

4. Теоретико-информационный подход к квантовой микроскопии, основанный на построении матрицы информации Фишера, позволяет сформулировать операциональное количественное определение оптического разрешения, построить итеративный алгоритм реконструкции амплитуды пропускания исследуемого объекта и предсказать повышение разрешения при использовании перепутанного оптического состояния в случае детектировании одного из фотонов вне апертуры линзы микроскопа.

5. Информационно-операторный подход к оптимизации измерений и обработке данных, основанный на использовании информации Фишера, байесовской оценки вероятностей моделей и операторного описания рентгеновских оптических элементов, обеспечивает построение универсальных автоматизируемых методов расчета инструментальной функции рентгеновского дифрактометра, идентификации спектральных паттернов в рентгеновской порошковой дифрактометрии и масс-спектрометрии и планирования и оптимизации экспериментов в рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения.

Личный вклад соискателя ученой степени. Диссертационная работа отражает личный вклад автора в проведенные исследования. Ключевые идеи исследования и полученные результаты обсуждались с научным консультантом д. физ.-мат. наук, чл.-корр. Д. С. Могилевцевым (главы 2–5), д. физ.-мат. наук, профессором, акад. С. Я. Килиным (главы 1–3), д. физ.-мат. наук, профессором А. П. Ульянковым (глава 6). Все соавторы статей участвовали в обсуждении физического контекста идей и полученных результатов. Для демонстрации эффективности предложенных подходов использовались результаты численных расчетов, проведенных совместно со студентами, магистрантами и аспирантами, обучавшимися под научным руководством соискателя: В. С. Реутом (оценка точности представления неклассических состояний с помощью когерентных для метода паттернов данных) и А. А. Саковичем (программная реализация итеративного алгоритма реконструкции объектов в квантовой микроскопии). Применимость приближений, использованных в диссертации при построении модели «фотонной пушки», дополнительно проверялась сравнением результатов соискателя с расчетами, проведенными альтернативными методами М. Торнтоном (M. Thornton), П. де ла Хозом (P. de la Hoz, университет г. Сент-Эндрюс, Великобритания) и А. А. Саковичем (в рамках обучения в аспирантуре под научным руководством соискателя). Разработанные в диссертационной работе методы были применены к экспериментальным данным, предоставленным группами проф. А. Стефанова (A. Stefanov, Бернский университет, Швейцария) и Д. Бойко (Швейцарский центр электроники и микроэлектроники) для квантовой мик-

роскопии и компанией Cameca Instruments (США) для масс-спектрометрии.

Апробация результатов диссертации. Результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертации, докладывались на международных научных конференциях и семинарах «Нелинейные явления в сложных системах» (Минск, Беларусь, 2009, 2010), «Quantum cryptography and computing: theory and implementations» (Гданьск, Польша, 2009); «International conference on quantum optics and quantum information» (Вильнюс, Литва, 2008; Киев, Украина, 2010; Минск, Беларусь, 2015, 2017, 2019), «New trends in quantum dynamics and entanglement» (Триест, Италия, 2011), «Interdisciplinary research and future technologies» (Минск, Беларусь, 2011), «International conference on quantum technologies» (Москва, Российская Федерация, 2011), «Quantum information and measurement» (Берлин, Германия, 2012, 2014; Рим, Италия, 2019), «Central European workshop on quantum optics» (Синая, Румыния, 2012; Пальма-де-Майорка, Испания, 2018), IV Конгрессе физиков Беларуси (Минск, Беларусь, 2013), «International conference on coherent and nonlinear optics» (Москва, Российская Федерация, 2013; Минск, Беларусь, 2016), «Современные проблемы физики» (Минск, Беларусь, 2014, 2016 — пленарный доклад), «Biennial conference on high-resolution X-ray diffraction and imaging» (Виллар-де-Ланс, Франция, 2014; Брно, Чехия, 2016; Бари, Италия, 2018), «Прикладные и фундаментальные аспекты теоретической физики» (Минск, Беларусь, 2014 — приглашенный доклад), «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики» (Великий Новгород, Российская Федерация, 2015, 2016), «The European powder diffraction conference» (Бари, Италия, 2016), «Asia-Pacific conference & workshop on quantum information science» (Баку, Азербайджан, 2016 — приглашенный доклад), «International mass spectrometry conference» (Флоренция, Италия, 2018), «Frontiers of nonlinear physics» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2019 — приглашенный доклад), «Молодежь в науке» (Минск, Беларусь, 2019), «Quantum technology international conference» (онлайн, 2020), «CLEO/Europe-EQEC 2021» (онлайн, 2021), «International conference on microwaves, communications, antennas and electronic systems» (онлайн, 2021), «2nd European quantum technologies virtual conference» (онлайн, 2021).

Опубликование результатов диссертации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 118 работах, включая 30 статей [1–30] в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК РБ, и иностранных рецензируемых научных журналах (общим объемом 35,3 авторского листа), и 88 публикаций в сборниках материалов [31–69] и тезисов [70–118] конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет

46,1 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя оглавление, перечень условных обозначений, введение, общую характеристику работы, шесть глав, заключение, библиографический список и пять приложений.

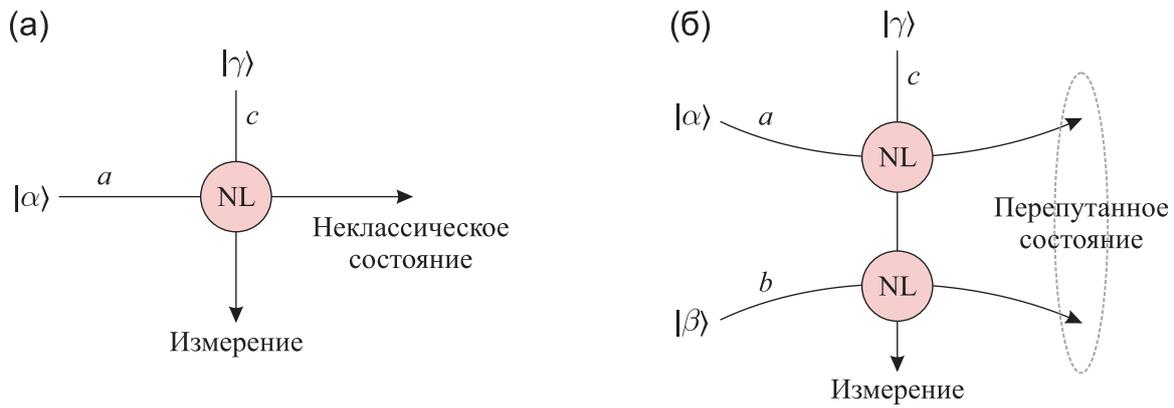
Полный объем диссертации составляет 343 страницы. Диссертация содержит 72 рисунка, занимающих в совокупности 66 страниц, 5 таблиц, занимающих в совокупности 5 страниц, 5 приложений, занимающих в совокупности 41 страницу. Библиографический список включает 771 наименование и занимает 56 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** введены основные понятия, используемые в диссертации, перечислены свойства квантовых измерений, важные для дальнейшего изложения результатов, и представлены математические основы обработки и анализа информации, получаемой в результате измерений.

Выделены ключевые особенности квантовых измерений: «скрытый» характер квантовой информации и неизбежное воздействие измерения на исследуемое состояние. Введено понятие управления квантовым состоянием путем измерения, в том числе «удаленного управления» на основе квантовой перепутанности (преобразования состояния одной подсистемы при проведении измерения над другой подсистемой, в том числе находящейся на большом расстоянии). Обсуждается интерпретация неунитарного взаимодействия открытой квантовой системы с окружением в виде непрерывного измерения, результаты которого остаются неизвестны наблюдателю. Такой подход указывает на возможность неунитарного управления открытыми квантовыми системами и позволяет использовать для этой цели наработки в области вероятностного преобразования состояний при измерении.

Обсуждается специфика состояний и измерений в квантовой оптике: необходимость работы с сигналами однофотонного уровня с выраженными квантовыми свойствами, удобство передачи оптических импульсов на большие расстояния для использования в квантовой коммуникации и невозможность создания неклассических и перепутанных состояний без использования нелинейных оптических преобразований. В связи с важностью неклассических состояний поля для повышения точности измерений (в том числе благодаря квантовой интерференции), а также для обработки информации отмечается актуальность разработки методов контролируемого и эффективного создания таких состояний при использовании доступных на практике ресурсов.



Создание неклассических состояний моды a (а) и перепутанных состояний мод a и b (б) с использованием нелинейного взаимодействия (NL) со вспомогательным полем c и усиления неклассических свойств «исключающим» измерением. Начальными состояниями полей a , b и c являются когерентные состояния $|\alpha\rangle$, $|\beta\rangle$ и $|\gamma\rangle$.

Рисунок 1 – Создание неклассических и перепутанных состояний с использованием перекрестной модуляции фазы

Вводятся основные понятия квантовой томографии (восстановления параметров квантовых состояний и процессов по проводимым измерениям) и квантовой метрологии (использования квантовых систем-зондов для повышения точности оценки параметров взаимодействующих с ними объектов). Обсуждается связь вероятностей различных исходов измерения, реконструируемых параметров исследуемой системы и количества информации. Вводятся матрица информация Фишера и неравенство Крамера-Рао, позволяющие количественно характеризовать информативность измерений и предсказывать погрешность оценки параметров.

Во **второй главе** рассмотрено управление квантовыми состояниями путем косвенного измерения: взаимодействия сигнальной квантовой системы со вспомогательным объектом, состояние которого затем измеряется (рисунок 1(а)). В качестве эффективного инструмента для такого управления предложена концепция «исключающего» измерения, один из исходов которого свидетельствует о том, что входное состояние измеряемой моды не являлось ни одним из исключаемых состояний (или их суперпозицией). Показано, что измерение, исключающее когерентные состояния, соответствует детектированию наличия фотонов после когерентного сдвига и может быть реализовано с использованием опорного поля в когерентном состоянии, линейных делителей излучения и детекторов, не разрешающих число фотонов [2, 4, 5].

Построено операторное описание измерения, исключающего когерентные состояния [4, 51, 54]. Элемент положительной операторнозначной меры, описывающий успешный исход исключающего измерения, можно предста-

вить в виде

$$P_{\text{elim.}}(\{\gamma_j\}) = \prod_j \left[1 - (1 - \varepsilon) e^{-\eta(c^\dagger - \gamma_j^*)(c - \gamma_j)/K} \right], \quad (1)$$

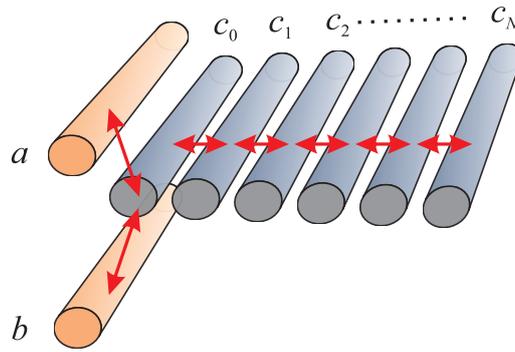
где $\{\gamma_j\}_{j=1}^K$ — амплитуды исключаемых когерентных состояний, K — их количество, η — эффективность детекторов, ε — вероятность темновых отсчетов, c^\dagger и c — операторы рождения и уничтожения фотонов рассматриваемой моды поля, двоеточие обозначает нормальное упорядочение операторов.

Концепция «исключающих» измерений иллюстрируется их применением для усиления неклассических свойств квантовых состояний. Показано, что сочетание слабой перекрестной модуляции фазы в среде с нелинейностью Керра и измерений, исключая когерентные состояния, позволяет создавать квантово-оптические состояния с выраженными неклассическими свойствами, включая одно- и двухфотонные фоковские состояния, а также суперпозиции однофотонного и вакуумного состояний. При использовании двух сигнальных мод (рисунок 1(б)) возможно создание перепутанных состояний, включая состояния с квантово-коррелированным распределением одного и двух фотонов между сигнальными модами.

Показано, что особенности нелинейного взаимодействия, обеспечивающего перекрестную модуляцию фазы, позволяют эффективно заменить потерю фотонов из сигнальной и вспомогательной мод поля фазовым шумом и построить операторное описание отклонения результирующего квантового состояния от целевого из-за неидеальности оборудования. Проведенные численные оценки указывают на практическую реализуемость предложенного метода создания неклассических и перепутанных состояний с использованием перекрестной модуляции фазы и исключаящих измерений [1–6, 51, 54].

В **третьей главе** представлены методы неунитарного управления квантовыми состояниями, при котором роль эффективного измерения играет взаимодействие с окружением. Рассмотрены две системы, способные создавать таким образом ценные неклассические оптические состояния: «фотонная пушка» — детерминистический генератор неклассических состояний света, использующий систему волноводов в нелинейном стекле, — и одноатомный лазер — модельная открытая система, состоящая из двухуровневого атома и моды поля в резонаторе, взаимодействующих с некогерентным окружением.

Показано, что для «фотонной пушки», представленной на рисунке 2, взаимодействие пары сигнальных мод с «хвостом» связанных волноводов обеспечивает эффективное возникновение нелинейных когерентных [7, 8, 10, 11, 23, 52] и двухфотонных [25] потерь, описываемых операторами Линдблада $n_- s_-$ и s_-^2 соответственно, где n_- и s_- — операторы числа фотонов и уничтожения фотонов для антисимметричной комбинации сигнальных мод.



Сигнальные моды a и b связаны друг с другом через унитарное взаимодействие с модой c_0 резервуара, реализованного с помощью линейного массива вспомогательных волноводов c_1, \dots, c_N («хвоста»). Волноводы «хвоста» взаимодействуют друг с другом унитарным образом благодаря близкому расположению друг к другу.

Рисунок 2 – Реализация «фотонной пушки» с использованием сети нелинейных волноводов

Асимметричная конфигурация с различающимися константами связи сигнальных волноводов с «хвостом» эффективна для создания ярких субпуассоновских состояний. Построенное аналитическое решение управляющего уравнения предсказывает возможность подавления влияния собственных линейных потерь волноводов на выходной сигнал и достижения значений параметра Мандела, близких к $Q = -0,8$, при использовании интенсивных входных состояний [23]. В симметричном режиме (при равных константах связи сигнальных волноводов с «хвостом» и возбуждении симметричной коллективной моды) «фотонная пушка» способна генерировать квантово-коррелированные фотонные пары [25].

Проведенный анализ указывает на возможность практической реализации «фотонной пушки» на основе нелинейного халькогенидного стекла при современном уровне технологий. При длине устройства 10 см предсказывается генерация субпуассоновских состояний с параметром Мандела $Q = -0,5$, ценных для подавления дробового шума в различных задачах квантовой метрологии. Для создания фотонных пар с частотой генерации порядка нескольких килогерц достаточно длины волноводов 14 см. Такие квантово-коррелированные состояния полезны для квантовых микроскопии, метрологии и коммуникации.

Рассмотренная модель одноатомного лазера включает унитарное взаимодействие атома и резонансной моды поля согласно модели Джейнса-Каммингса, некогерентную накачку атома, распад возбужденных состояний моды поля и атома, а также дефазировку атома. Проведен анализ динамики данной системы в фазовом пространстве на основе s -упорядоченных распре-

делений квазивероятностей, соответствующих сглаживанию функции Глаубера $P(\gamma)$ гауссовым фильтром:

$$P(\alpha; s) = \frac{2}{\pi(1-s)} \int d^2\gamma P(\gamma) \exp\left(-\frac{2|\alpha - \gamma|^2}{1-s}\right). \quad (2)$$

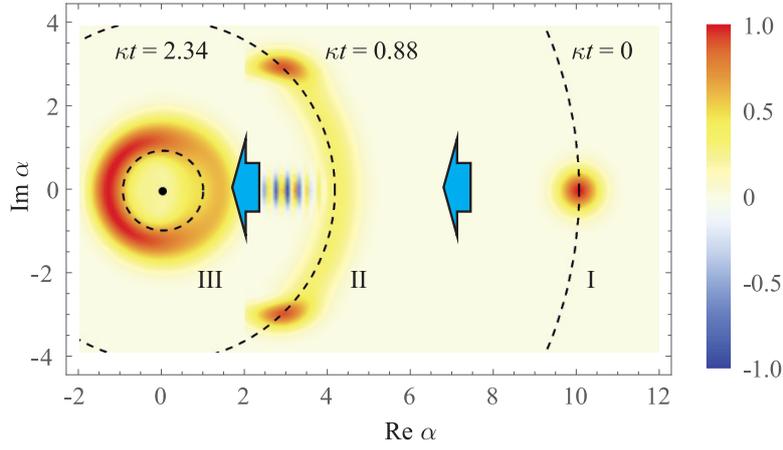
Продемонстрирована эффективность такого подхода для углубления понимания динамики одномодового одноатомного лазера с некогерентной накачкой, предсказания неклассических свойств генерируемых состояний и объяснения причин их возникновения [9, 14, 30].

Показано, что при начальном возбуждении резонаторной моды поля в когерентное состояние выделяются два этапа эволюции квантового состояния: начальный когерентный и некогерентный, обеспечивающий приближение к стационарному состоянию (рисунок 3). На когерентном этапе реализуется эффект, аналогичный фазовой бистабильности одноатомного лазера с непрерывной когерентной накачкой. Показана возможность генерации квантовых состояний с выраженными неклассическими свойствами: гибридных атомно-полевых перепутанных состояний и оптических состояний «кота Шредингера» (суперпозиции когерентных состояний $|\alpha_0 e^{igt/(2|\alpha_0|)}\rangle$ и $|\alpha_0 e^{-igt/(2|\alpha_0|)}\rangle$, где g — константа атомно-полевого взаимодействия, t — время с момента приготовления системы в начальном состоянии, α_0 — начальная амплитуда когерентного состояния поля). Для некогерентного этапа динамики предсказывается возникновение двухпиковой радиальной структуры распределений квазивероятностей, сходной с эффектом амплитудной бистабильности для одноатомного лазера с когерентной накачкой. Показано, что генерируемые полевые состояния обладают неклассическими свойствами на всех этапах и могут использоваться, например, для повышения чувствительности измерений в квантовой метрологии [30].

Четвертая глава посвящена использованию измерений для получения информации о квантовых состояниях. В ней представлено развитие метода паттернов данных, позволяющего проводить томографию квантовых состояний без предварительной калибровки измерительной установки. Идея метода состоит в представлении оператора плотности ρ исследуемого состояния в виде смеси некоторого набора операторов плотности ρ_m , $m = 1 \dots M$, пробных состояний с положительными или отрицательными весами c_m :

$$\rho \approx \sum_{m=1}^M c_m \rho_m, \quad \sum_m c_m = 1. \quad (3)$$

Благодаря линейности квантовой механики вероятности p_j исходов произвольного измерения для состояния ρ описываются разложением с теми же



Изображено s -упорядоченное распределение квазивероятностей ($s = 0.5$) для резонаторной моды поля, нормированное на максимальное значение и совмещенное для различных этапов динамики: начального когерентного состояния с амплитудой $\alpha_0 = 10$ (I), когерентного (II) и некогерентного (III) этапов. κ — скорость линейных потерь резонатора, t — время с момента приготовления системы в начальном когерентном состоянии.

Рисунок 3 – Этапы динамики одноатомного лазера с некогерентной накачкой

коэффициентами c_m по вероятностям $p_j^{(m)}$ для пробных состояний:

$$p_j \approx \sum_{m=1}^M c_m p_j^{(m)}. \quad (4)$$

Проведя серию измерений для исследуемого состояния ρ и для пробных состояний ρ_m , можно использовать уравнение (4) для определения коэффициентов c_m и восстановить оператор плотности с помощью выражения (3). Эффективность метода зависит от оптимальности выбранного множества пробных состояний и последовательности измерений.

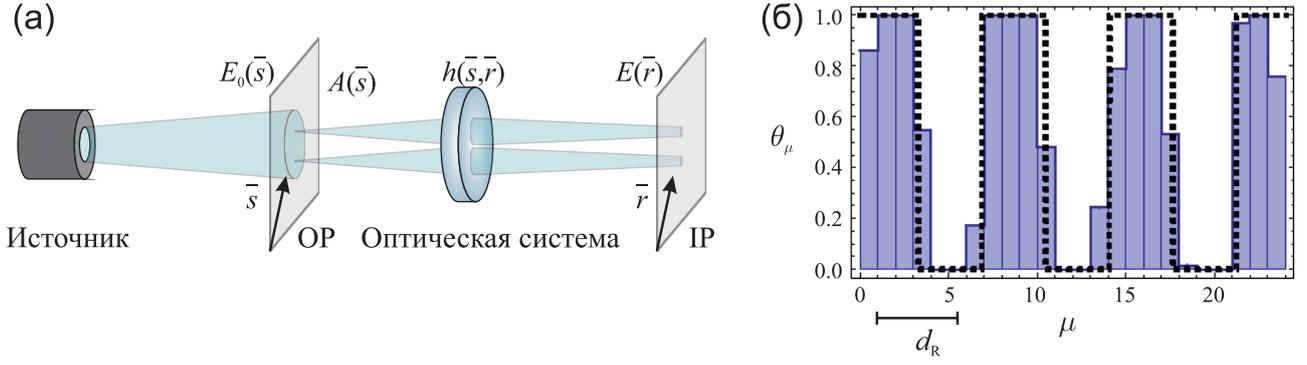
Проведена оптимизация выбора множества пробных квантовых состояний и исследованы возникающие систематические погрешности. Показано, что использование пробных когерентных состояний с амплитудами, принадлежащими квадратной или спиральной сетке, обеспечивает эффективное представление квантово-оптических состояний, типичных для квантовых протоколов обработки информации и содержащих малое число фотонов [18, 53]. Тензорные произведения одномодовых пробных когерентных состояний позволяют разложить перепутанные двухмодовые состояния с высокой точностью и устойчивостью к шумам коэффициентов разложения. Предложен итеративный байесовский подход, адаптивно выбирающий наиболее информативную последовательность измерений на основе получаемой информации об исследуемом состоянии [16, 17]. Для рассмотренных модельных примеров

данный метод позволяет снизить требуемое число измерений в $1,2 \div 2$ раза.

Общность и универсальность метода паттернов данных, обсуждаемая в данной главе, обеспечивает его применимость и за пределами квантовой томографии. В диссертации также предложен метод классической эмуляции квантовых экспериментов [29]. Показано, что результаты измерений для недоступного квантового состояния ρ можно воспроизвести, осуществляя данные измерения для набора доступных классических состояний ρ_m , $m = 1 \dots M$, и обрабатывая результаты особым образом. Если справедливо разложение (3), эмуляция эксперимента для состояния ρ состоит в случайном приготовлении состояний ρ_m с вероятностями $p_m \propto |c_m|$, проведении требуемых измерений и учете результатов с весами $+1$ и -1 , определяемыми знаком коэффициента c_m при пробном состоянии ρ_m , использованном для данного измерения. Средние значения произвольных наблюдаемых, построенные указанным образом, совпадут с результатами, которые были бы получены для эмулируемого квантового состояния ρ , благодаря линейности квантовой механики. В диссертации разработаны схемы установок, обеспечивающих эмуляцию детектирования неклассических свойств однофотонного состояния, эффекта Хонга-У-Манделя, повышения чувствительности квантовой метрологии и нарушения неравенств Белла с использованием когерентных состояний. В прикладном аспекте данный подход полезен как для разработки недорогих учебно-демонстрационных квантово-оптических комплексов, так и для тестирования и калибровки квантовых измерительных систем.

Обобщение метода паттернов данных на задачи с нелинейной зависимостью сигнала от коэффициентов разложения позволило оптимизировать состояние квантовой антенны для направленного излучения фотонных пар. При фиксированной геометрии антенны изменение коллективного квантового состояния излучателей позволяет добиться коррелированных, антикоррелированных или фиксированных направлений распространения фотонов или подавить излучение в дальней зоне [20, 21]. Результат представляет как фундаментальный интерес, так и практическую значимость для квантовой метрологии, микроскопии и коммуникации.

В **пятой главе** обсуждается задача квантовой микроскопии — преодоление классического (рэлеевского) предела разрешения при использовании квантовых корреляций излучения. На рисунке 4(а) приведена общая схема измерительной установки в квантовой микроскопии. Фотоны, находящиеся в пространственно коррелированном (перепутанном) состоянии, играют роль квантового зонда. После прохождения через исследуемый объект квантовое состояние излучения содержит информацию об амплитуде пропускания данного объекта. Корреляционное изображение порядка M формируется в результате одновременной (в рамках заданного временного окна) регистрации



(а) Общая схема измерения в квантовой микроскопии. Увеличенное изображение объекта с амплитудой пропускания $A(\vec{s})$, помещенного в объектную плоскость ОР и освещенного источником излучения с известными свойствами, формируется оптической системой с функцией Грина $h(\vec{s}, \vec{r})$ в плоскости изображения IP. (б) Пример реконструкции амплитуды пропускания модельного объекта (трех непрозрачных полос на прозрачной мишени, освещенной бифотонами) на основе измеренного корреляционного изображения второго порядка. Отрезок в нижней части гистограммы указывает рэлеевский предел разрешения, пунктирные линии — ожидаемую форму модельного объекта.

Рисунок 4 – Получение и обработка данных в квантовой микроскопии

фотонов M пикселями матричного фотодетектора и описывается корреляционной функцией поля

$$G^{(M)}(\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M) = \langle E^{(-)}(\vec{r}_1) \dots E^{(-)}(\vec{r}_M) E^{(+)}(\vec{r}_M) \dots E^{(+)}(\vec{r}_1) \rangle, \quad (5)$$

где $\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_M$ — положения соответствующих пикселей детектора; $E^{(+)}(\vec{r})$ и $E^{(-)}(\vec{r}) = [E^{(+)}(\vec{r})]^\dagger$ — положительно- и отрицательно-частотные операторы электрического поля в точке \vec{r} соответственно. Ненулевой вклад в выражение (5) вносят только составляющие полевых операторов, имеющие вид

$$E^{(+)}(\vec{r}) = \int_{\text{ОР}} d^2\vec{s} A(\vec{s}) h(\vec{s}, \vec{r}) E_o^{(+)}(\vec{s}), \quad (6)$$

а также сопряженные к ним, где $h(\vec{s}, \vec{r})$ — функция рассеяния точки (функция Грина) оптической системы, формирующей изображение объекта; $E_o^{(+)}(\vec{s})$ — положительно-частотная компонента оператора электрического поля в плоскости объекта ОР; $A(\vec{s})$ — амплитуда пропускания исследуемого объекта. Использование квантовых корреляций фотонов в микроскопии дает возможность повысить оптическое разрешение и преодолеть рэлеевский предел, но требует развития новых подходов к эффективному использованию измеренных данных и количественной оценке разрешения.

В соответствии с идеями метода паттернов данных в диссертации предложено представление искомой амплитуды пропускания объекта в форме

взвешенной суммы некоторых базисных функций g_μ (например, соответствующих разложению объекта на прямоугольные пиксели): $A(\vec{s}) = \sum_\mu \theta_\mu g_\mu(\vec{s})$. Тогда измеряемый корреляционный сигнал (5) принимает вид полинома степени $2M$ относительно коэффициентов разложения θ_μ , определение которых и составляет задачу квантовой микроскопии в данной параметризации.

Объединение нелинейной версии метода паттернов данных с формализмом информации Фишера позволило разработать информационный подход, продуктивный для анализа структуры корреляционных изображений, оценки разрешения и оптимизации измерительных схем квантовой микроскопии [22, 26]. Предложен итеративный алгоритм реконструкции амплитуды пропускания объекта по его измеренному корреляционному изображению. Приближенно ленточная структура матрицы информации Фишера указывает на локальность задачи квантовой микроскопии и обеспечивает применимость разработанного метода «скользящего окна» — итеративной процедуры реконструкции протяженных объектов путем их разбиения на перекрывающиеся части (окна). Эффективность и устойчивость подхода были подтверждены на экспериментальных данных (рисунок 4(б)), полученных в модельных экспериментах групп А. Стефанова в Бернском университете и Д. Бойко в Швейцарском центре электроники и микроэлектроники.

Введено операциональное определение оптического разрешения как минимального размера деталей объекта (ширины пикселей в его представлении) d_{\min} , для восстановления которых достаточно информации в измеренном изображении:

$$d_{\min} = \min\{d : \text{Tr } F^{-1} \leq \varepsilon\}, \quad (7)$$

где ε — допустимая величина суммарной дисперсии реконструируемых параметров; F — матрица информации Фишера для рассматриваемого измерения; величина $\text{Tr } F^{-1}$ задает нижнюю границу суммарной дисперсии реконструируемых параметров согласно неравенству Крамера-Рао. Данное определение имеет прямой практический смысл (вообще говоря, не обеспечиваемый традиционными подходами — например, на основе критерия Рэлея) и позволяет одновременно учесть чувствительность измерения и присутствующие шумы. Кроме того, построенный информационный подход позволяет учесть влияние априорной информации об объекте (физических ограничений) на достижимое разрешение путем модификации матрицы информации Фишера.

Особенности квантовых измерений перепутанных фотонных состояний (явление «удаленного управления») приводят в противоречащим интуиции эффектам и могут использоваться для повышения разрешения. Проведен анализ увеличения оптического разрешения при потере (игнорировании) одного из фотонов, находящихся в перепутанном состоянии и используемых в

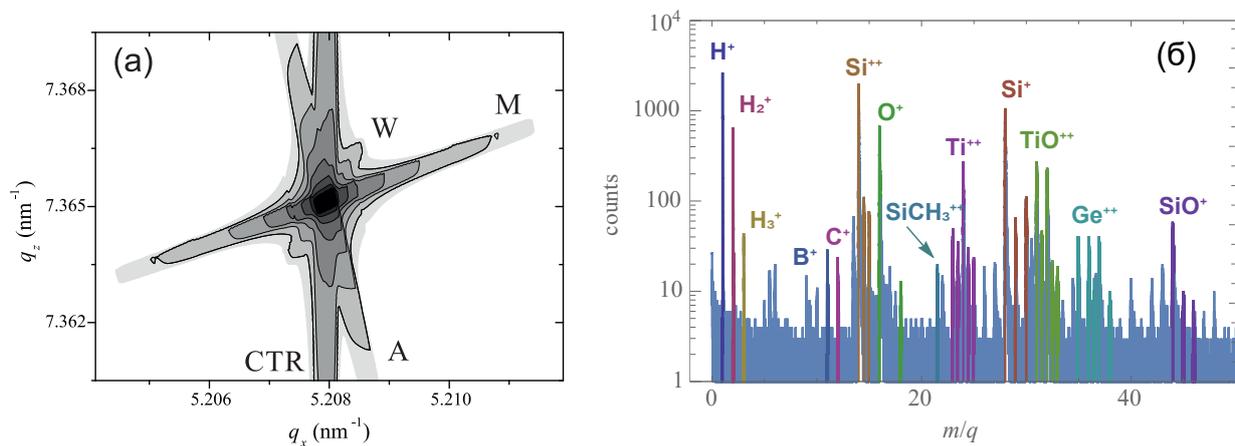
квантовом микроскопе. Выявлен механизм создания более чувствительного состояния-зонда при вероятностном преобразовании перепутанного квантово-оптического состояния в результате воздействия на один из фотонов. На основе обнаруженного эффекта предложен метод повышения оптического разрешения путем постселекции событий детектирования, для которых один из фотонов проходит вне апертуры оптической системы, формирующей корреляционное изображение [27].

Шестая глава посвящена обобщению подходов, представленных в главах 2–5, — анализа информации Фишера, байесовской оценки вероятностей, операторного описания процессов — на оптимизацию и обработку результатов классических измерений в рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии.

Продемонстрирована эффективность применения операторного метода, разработанного для описания «исключающих» измерений и диссипативной динамики квантовых полей, для моделирования инструментальной функции рентгеновского дифрактометра. На его основе предложен метод полуаналитической обратной трассировки лучей, обеспечивающий унифицированное описание различных рентгеновских оптических элементов и представляющий их влияние на форму пучка в терминах проекционных операторов [15]. Аналитическое интегрирование по пространственному распределению интенсивности в пучке и ограничение пределов интегрирования областью ненулевых значений при анализе углового распределения лучей обеспечивают высокую точность и значительное снижение времени расчетов по сравнению с другими методами. Пример моделирования инструментальной функции рентгеновского дифрактометра для его типичной конфигурации представлен на рисунке 5(а).

На основе обобщения метода паттернов данных разработан байесовский подход к распознаванию характерных структур в данных порошковой рентгеновской дифракции и ионной масс-спектрометрии [19, 24]. Предложенная методика позволяет рассчитать вероятности наличия различных компонент в истинной модели образца из первых принципов: на основе физической модели шумов, усредненных свойств базы данных материалов и общих соотношений теории вероятностей. По сравнению с традиционными подходами, данный метод не требует экспертных знаний для «угадывания» конечного алгоритма и является универсальным — подходит для любых измерений, сигнал которых линеен по концентрациям компонент образца. Продемонстрирована эффективность подхода для порошковой рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии (рисунок 5(б)).

Показано, что методы анализа и оптимизации измерений на основе информации Фишера эффективны также в области рентгеновской дифракции



(a) Моделирование сигнала в рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения с учетом инструментальных эффектов. Представлена карта обратного пространства для брэгговского отражения 224 кристалла кремния с нормалью, ориентированной в направлении (001). Конфигурация дифрактометра включает монохроматор Ge(004)x4 и анализатор Ge(220)x2. CTR — полоса, обусловленная влиянием границы образца; M — полоса монохроматора; A — полоса анализатора; W — полоса длины волны. (б) Идентификация пиков в масс-спектре атомной зондирующей томографии для полупроводникового устройства из кремния с использованием байесовского подхода. Подписи указывают идентифицированные паттерны ионов.

Рисунок 5 – Примеры использования разработанных методов анализа измерений в задачах классической физики

[12, 13, 28]. Разработан метод выбора оптимальной конфигурации измерений в рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения на основе минимизации суммарной дисперсии исследуемых параметров, предсказываемой неравенством Крамера-Рао. Эффективность подхода продемонстрирована на примере выбора оптимального брэгговского отражения для определения концентраций компонент твердого раствора и релаксации кристаллических слоев полупроводниковой структуры по положениям пиков на карте обратного пространства.

Все методы, представленные в данной главе, были успешно алгоритмированы и использованы для проведения анализа в автоматическом режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Разработаны методы генерации квантовых состояний, управления ими и получения информации на основе квантовых измерений. Предложенные подходы позволяют расширить множество генерируемых квантовых со-

стояний по сравнению с известными ранее подходами, повысить эффективность использования измеренных данных в квантовой томографии и микроскопии, а также классических областях физики и закладывают основу для дальнейшего развития методов квантовой метрологии.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод вероятностного управления квантово-оптическими состояниями на основе «исключающих» измерений для генерации неклассических и перепутанных оптических состояний. Построено операторное описание преобразования квантовых состояний в результате таких измерений и диссипативного взаимодействия с окружением. Определены условия создания фоковских состояний, их суперпозиций, а также перепутанных состояний оптических кубитов и кутритов [1—6, 51, 54].

2. Определены оптимальные условия создания субпуассоновских и бифотонных состояний методами когерентной диффузионной фотоники в системах нелинейных волноводов [7, 8, 10, 11, 23, 25, 52].

3. Проведен анализ динамики одноатомного лазера и определены условия генерации состояний, обладающих значительными неклассическими свойствами, включая оптическое состояние «кота Шредингера». Обнаружено проявление эффектов фазовой и амплитудной бистабильности в динамике одноатомного лазера с некогерентной накачкой при условии начального когерентного возбуждения поля [9, 14, 30].

4. Разработан адаптивный подход к квантовой томографии паттернов данных, обеспечивающий последовательный выбор наиболее информативных измерений с учетом информации об исследуемом состоянии, восстановленной на основе предшествующих измерений. Продемонстрировано уменьшение количества операций, требуемых для надежной реконструкции квантового состояния, по сравнению с традиционным подходом с фиксированной последовательностью измерений [16—18, 53].

5. Предложен метод оптимизации состояния квантовой антенны для формирования заданной пространственной структуры генерируемого излучения на основе паттернов данных. Определены состояния квантовой антенны, обеспечивающие коррелированное, антикоррелированное и направленное распространение излучаемых фотонов [20, 21].

6. Разработан метод эмуляции квантовых экспериментов путем разложения требуемых квантовых состояний по классическим пробным состояниям. Воспроизведение корректных значений вероятностей и математического ожидания наблюдаемых величин обеспечивается согласованием частот случайной генерации пробных состояний и весов, с которыми усредняются соответствующие им результаты измерения, с коэффициентами разложения эмулируемого состояния по пробным [29].

7. На основе анализа структуры матрицы информации Фишера в задаче квантовой микроскопии разработан итеративный метод «скользящего окна», позволяющий эффективно проводить реконструкцию амплитуды пропускания протяженного объекта и обеспечивающий линейное масштабирование времени, необходимого для реконструкции, относительно размера объекта [22].

8. Предложен метод количественного определения оптического разрешения в задаче квантовой микроскопии на основе информации Фишера и неравенства Крамера-Рао. Метод применим к произвольному типу измеряемого сигнала, включая корреляционные функции высоких порядков, и позволяет одновременно учесть чувствительность измерения к изучаемым характеристикам объекта и уровень шума [22, 26].

9. Разработан метод вероятностного повышения разрешения в квантовой микроскопии, использующей перепутанные состояния с двумя и более фотонами, на основе детектирования одного из фотонов вне основного пути оптического пучка [27].

10. Разработан операторный подход к моделированию инструментальной функции рентгеновского дифрактометра, обеспечивающий эффективность расчета при произвольной измерительной конфигурации [15].

11. Предложен байесовский подход к идентификации спектральных паттернов известных веществ при их одновременном присутствии в спектре образца в рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии [19, 24].

12. Разработан метод оптимизации измерений в рентгеновской дифрактометрии, обеспечивающий выбор наиболее информативных брэгговских отражений и измерительной геометрии в автоматическом режиме на основе максимизации информации Фишера [12, 13, 28].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные в диссертации, представляют существенный интерес с точки зрения практической реализации методов квантовой передачи, обработки и защиты информации; повышения точности и эффективности диагностики квантовых состояний и их использования в задачах квантовой микроскопии и метрологии.

Неклассические оптические состояния, создание которых обсуждается в главах 2 и 3, ценны для квантовой обработки информации (квантовой криптографии, квантового голосования, осуществления квантовой телепортации и распределенных квантовых вычислений) и повышения точности измерений в квантовой метрологии. Предложенные методы создания таких состояний соответствуют возможностям современного оборудования, о чем свидетельствуют как представленные в главах 2 и 3 численные оценки, так и резуль-

таты работы над прототипом «фотонной пушки» в рамках международного проекта «Субпуассоновский фотонный генератор на основе когерентной диффузной фотоники» (шифр «PhoG»). Разработанные подходы могут использоваться при решении задач квантовой обработки, передачи и защиты информации, исследуемых в Институте физики, Объединенном институте проблем информатики и Институте математики НАН Беларуси, Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, Белорусском государственном университете, Объединенном институте ядерных исследований г. Дубна (Российская Федерация), Инновационном центре «Сколково», Казанском квантовом центре, университетах гг. Париж (Франция), Сент-Эндрюс (Великобритания), Берн (Швейцария), Сеул (Южная Корея), Милуоки (США), Научно-технологическом университете им. короля Абдаллы (Саудовская Аравия) и ряде других научных центров.

Квантовые томография и диагностика, рассмотренные в главе 4, являются неотъемлемой частью большинства практических систем генерации и применения квантовых состояний, включая изучаемые и используемые в перечисленных выше научных центрах. Инструменты анализа, оптимизации и эмуляции квантовых состояний, разработанные в диссертации, важны для эффективного решения задач верификации источников однофотонных, запутанных, сжатых состояний; проверки и оценки точности квантовых вентилях, систем для детерминированного и вероятностного управления квантовыми состояниями; диагностики квантовых систем детектирования, в том числе за счет эмуляции квантовых эффектов при недоступности источников требуемых квантовых состояний. Предложенный метод управления излучением фотонов квантовыми антеннами важен для квантовой микроскопии и создания квантовых радаров — измерительных систем, способных детектировать пространственное положение и динамику микроскопических объектов при минимизации их фотодеструкции, — и может применяться при исследованиях (включая детектирование биологических молекул) в Институте физики, Институте физико-органической химии и Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Белорусском государственном университете, университетах гг. Тель-Авив (Израиль), Павиа (Италия), Китайской академии наук, Массачусетском технологическом институте (США).

Квантовая микроскопия, методы которой развиваются в главе 5, обеспечивает получение четких изображений микрообъектов за пределами классического разрешения оптического микроскопа и позволяет исследовать биологические объекты в видимом свете, не разрушая их более жестким рентгеновским излучением. Разработанный в диссертации итеративный метод реконструкции получаемых корреляционных изображений значительно увеличивает эффективность использования собираемой информации и может допол-

нительно повышать достижимое разрешение (более, чем в 6 раз при исследовании высоко контрастных объектов). Целесообразность применения данного подхода к анализу изображений была подтверждена на практике в рамках международного проекта «Микроскопия сверхвысокого разрешения на перепутанных состояниях фотонов» (шифр «SUPERTWIN») с использованием действующего прототипа квантового микроскопа. Предложенная количественная мера достижимого оптического разрешения на основе информации Фишера закладывает фундамент для последовательной оптимизации практических установок квантовой и классической микроскопии и их адаптации к решению конкретных задач. Полученные результаты могут применяться для более эффективного решения многочисленных задач микроскопии, исследуемых в Институте физики и Институте генетики и цитологии НАН Беларуси, Белорусском национальном техническом университете, Белорусском государственном университете, Московском государственном университете, Национальном исследовательском университете ИТМО (Российская Федерация), Бернском университете (Швейцария), Швейцарском центре электроники и микроэлектроники, Институте Бруно Кесслера (Италия), Институте Макса Планка (Германия), Университете Мэриленд (США), Национальном университете Сингапура, Научно-технологическом университете им. короля Абдаллы (Саудовская Аравия) и многих других научных центрах.

Наряду с непосредственной практической ценностью, разработанные подходы также важны с методологической точки зрения. Они представляют теоретическую основу для дальнейшей разработки методов вероятностного и диссипативного управления квантовыми состояниями, их диагностики и использования в качестве квантовых зондов и могут, в том числе, использоваться при научной работе студентов, магистрантов и аспирантов в Институте физики НАН Беларуси и Белорусском государственном университете. К настоящему времени дальнейшее развитие методик, предложенных соискателем, вошло в состав ряда дипломных работ и магистерских диссертаций (А.А. Саковича, П.И. Новика, В.С. Реута, И.А. Пешко, К.И. Жевно), а также кандидатской диссертации С.В. Власенко. Кроме того, общие идеи (в частности, операциональное определение оптического разрешения и его связь с информацией, основы вероятностного и диссипативного управления квантовыми состояниями), представленные в диссертации, могут быть включены в учебные программы для студентов и магистрантов Белорусского государственного университета и Университета НАН Беларуси, а также использованы при разработке лабораторных практикумов. В настоящее время они используются в курсе лекций «Квантовая оптика» на физическом факультете Белорусского государственного университета и в научно-учебном электронно-оптическом и виртуальном комплексе по квантовой оптике и квантовой ин-

форматике, внедренном в учебный процесс в 2020 г.

Применение разработанных методов за пределами квантовых исследований (глава 6) обеспечивает инструментарий для анализа и оптимизации классических измерений из первых принципов без апелляции к интуитивным представлениям. Программный код, подготовленный соискателем на основе результатов диссертационного исследования и обеспечивающий расчет инструментальной функции рентгеновских дифрактометров, был использован компанией «Атомикус» (Беларусь) при разработке коммерческих приложений для ведущих производителей аналитического рентгенодифракционного оборудования — Rigaku (Япония) и Bruker (Германия) — и представляет ценность для таких компаний, как «Адани» (Беларусь), «Буревестник» (Российская Федерация), Malvern Panalytical (Великобритания). Байесовский подход к интерпретации спектров, представленный в диссертации и включенный компанией «Атомикус» в программные продукты для компаний «Адани» (Беларусь), Stoe (Германия), Cameca/Ametek (США), важен как для дальнейшего коммерческого применения (включая возможное использование компаниями «Сол Инструментс» (Беларусь), «Буревестник» (Российская Федерация), Applied Spectra (США), Bruker (Германия), Analytik Jena (Германия)), так и для решения научных задач в Институте физики и Научно-практическом центре по материаловедению НАН Беларуси, Белорусском государственном университете и других исследовательских центрах. Разработанный алгоритмический подход к оптимизации условий измерения на основе информации Фишера универсален и может применяться как при разработке управляющего программного обеспечения для коммерческих аналитических приборов (в том числе выпускаемых перечисленными выше компаниями), так и при планировании научных экспериментов разнообразными исследовательскими центрами и лабораториями.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Long distance entanglement of continuous variables in fiber // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 2009. — Vol. 12, no. 2. — P. 150–158.
2. Килин, С. Я., Михалычев, А. Б. Создание перепутанности непрерывных переменных с использованием малой нелинейности Керра // *Оптика и спектроскопия*. — 2010. — Т. 108, № 2. — С. 209–218.
3. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Continuous variable entanglement creation by means of small cross-Kerr nonlinearity // *Quantum Cryptography and Computing: Theory and Implementation*. Vol. 26. — IOS Press, 2010. — P. 201. — (NATO Science for Peace and Security Series - D: Information and Communication Security).
4. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Optical qudit-type entanglement creation at long distances by means of small cross-Kerr nonlinearities // *Physical Review A*. — 2011. — Vol. 83. — P. 052303.
5. Килин, С. Я., Михалычев, А. Б. Qudit-type entanglement of continuous variables via weak cross-Kerr nonlinearity // *Оптика и спектроскопия*. — 2011. — Т. 111. — С. 582–587.
6. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Weak cross-Kerr nonlinearity as a resource for quantum state engineering // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 2011. — Vol. 14. — P. 1–13.
7. Mikhalychev, A., Mogilevtsev, D., Kilin, S. Nonlinear coherent loss for generating non-classical states // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. — 2011. — Vol. 44, no. 32. — P. 325307.
8. Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S., Kilin, S. Y. Nonlinear coherent loss // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 2011. — Vol. 14. — P. 241–252.
9. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single-atom laser generates nonlinear coherent states // *Physical Review A*. — 2012. — Vol. 85. — P. 063817.
10. Overcoming linear dissipation by designed nonlinear loss / A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, V. S. Shchesnovich, A. M. Ishkhanyan, S. Kilin // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. — 2013. — Vol. 16. — P. 162–180.
11. Nonlinear dissipation can combat linear loss / D. Mogilevtsev, A. Mikhalychev, V. S. Shchesnovich, N. Korolkova // *Physical Review A*. — 2013. — Vol. 87. — P. 063847.
12. Characterization of SiGe thin films using a laboratory X-ray instrument / T. Ulyanenkova, M. Myronov, A. Benediktovitch, A. Mikhalychev,

J. Halpin, A. Ulyanenko // *Journal of Applied Crystallography*. — 2013. — Vol. 46. — P. 898–902.

13. Covariant description of X-ray diffraction from anisotropically relaxed epitaxial structures / A. Zhylik, A. Benediktovitch, I. Feranchuk, K. Inaba, A. Mikhalychev, A. Ulyanenko // *Journal of Applied Crystallography*. — 2013. — Vol. 46. — P. 919–925.

14. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Nonlinearity and nonclassicality in single-qubit laser operation // *Physica Scripta T*. — 2014. — Vol. 160. — P. 014021.

15. Ab initio simulation of diffractometer instrumental function for high-resolution X-ray diffraction / A. Mikhalychev, A. Benediktovitch, T. Ulyanenkova, A. Ulyanenko // *Journal of Applied Crystallography*. — 2015. — Vol. 48. — P. 679–689.

16. Bayesian recursive data-pattern tomography / A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, Y. S. Teo, J. Řeháček, Z. Hradil // *Physical Review A*. — 2015. — Vol. 92. — P. 052106.

17. Crystallizing highly-likely subspaces that contain an unknown quantum state of light / Y. S. Teo, A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, J. Řeháček, Z. Hradil // *Scientific Reports*. — 2016. — Vol. 6. — P. 38123.

18. Reut, V., Mikhalychev, A., Mogilevtsev, D. Data-pattern tomography of entangled states // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 95. — P. 012123.

19. Mikhalychev, A., Ulyanenko, A. Bayesian approach to powder phase identification // *Journal of Applied Crystallography*. — 2017. — Vol. 50, no. 3. — P. 776–786.

20. Synthesis of quantum antennas for shaping field correlations / A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, G. Y. Slepyan, I. Karuseichyk, G. Buchs, D. L. Boiko, A. Boag // *Physical Review Applied*. — 2018. — Vol. 9. — P. 024021.

21. Quantum noise radar: superresolution with quantum antennas by accessing spatiotemporal correlations / I. Peshko, D. Mogilevtsev, I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. P. Nizovtsev, G. Y. Slepyan, A. Boag // *Optics Express*. — 2019. — Vol. 27. — P. 29217–29231.

22. Efficiently reconstructing compound objects by quantum imaging with higher-order correlation functions / A. B. Mikhalychev, B. Bessire, I. L. Karuseichyk, A. A. Sakovich, M. Unternährer, D. A. Lyakhov, D. L. Michels, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // *Communications Physics*. — 2019. — Vol. 2, no. 1. — P. 134.

23. Coherent diffusive photon gun for generating nonclassical states / M. Thornton, A. Sakovich, A. Mikhalychev, J. D. Ferrer, P. de la Hoz, N. Korolkova, D. Mogilevtsev // *Physical Review Applied*. — 2019. — Vol. 12. —

P. 064051.

24. Bayesian approach to automatic mass-spectrum peak identification in atom probe tomography / A. Mikhalychev, S. Vlasenko, T. R. Payne, D. A. Reinhard, A. Ulyanenko // *Ultramicroscopy*. — 2020. — Vol. 215. — P. 113014.

25. Integrated source of path-entangled photon pairs with efficient pump self-rejection / P. de la Hoz, A. Sakovich, A. Mikhalychev, M. Thornton, N. Korolkova, D. Mogilevtsev // *Nanomaterials*. — 2020. — Vol. 10. — P. 1952.

26. Optimal correlation order in superresolution optical fluctuation microscopy / S. Vlasenko, A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseichyk, D. A. Lyakhov, D. L. Michels, D. Mogilevtsev // *Physical Review A*. — 2020. — Vol. 102. — P. 063507.

27. Lost photon enhances superresolution / A. B. Mikhalychev, P. I. Novik, I. L. Karuseichyk, D. A. Lyakhov, D. L. Michels, D. S. Mogilevtsev // *npj Quantum Information*. — 2021. — Vol. 7. — P. 125.

28. Fisher information for optimal planning of X-ray diffraction experiments / A. Mikhalychev, K. Zhevno, S. Vlasenko, A. Benediktovitch, T. Ulyanenkova, A. Ulyanenko // *Journal of Applied Crystallography*. — 2021. — Vol. 54. — P. 1676–1697.

29. Emulation of quantum measurements with mixtures of coherent states / A. Mikhalychev, Y. S. Teo, H. Jeong, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // *Physical Review A*. — 2022. — Vol. 105, no. 5. — P. 052206.

30. Mikhalychev, A. B., Vlasenko, S. V., Kilin, S. Y. Phase-space dynamics of a single-atom laser: nonclassicality and bistability // *Physical Review A*. — 2022. — Vol. 105, no. 6. — P. 063723.

Материалы конференций

31. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Continuous variable entanglement creation over long distances // *Proceedings of SPIE*. Vol. 6726. — USA, 2007. — P. 67263D.

32. Михалычев, А. Б. Создание перепутанности с помощью нелокальных операций посредством квантового канала с шумом // *Сборник работ 64-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета*. Т. 1. — Мн., 2007. — С. 20–21.

33. Михалычев, А. Б., Килин, С. Я. Создание перепутанных состояний оптических полей при использовании сред с малой нелинейностью для устойчивой передачи квантовых состояний на большие расстояния по оптоволоконным каналам // *Сборник работ 65-й научной конференции студентов и*

аспирантов Белорусского государственного университета. Т. 2. — Мн., 2008. — С. 213—214.

34. Entanglement detection of GHZ states of electronic and two nuclear spins in NV center in diamond / S. Kilin, A. Mikhalychev, A. Nizovtsev, S. Kuten, F. Jelezko, J. Wrachtrup // Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies 2008 Technical Digest. — Washington, DC : Optical Society of America, 2008. — QTuB3.

35. Михалычев, А. Б., Килин, С. Я. Области классического и неклассического поведения излучения одноатомного лазера // Сборник работ 66-й научной конференции студентов и аспирантов Белорусского государственного университета. Т. 1. — Мн., 2009. — С. 66—69.

36. Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S., Kilin, S. Y. Nonlinear coherent loss for generating non-classical states // QIM-2012, OSA Technical Digest. — 2012. — JT2A.15.

37. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single-qubit laser: generation of nonlinear coherent states // QIM-2012, OSA Technical Digest. — 2012. — QW3B.1.

38. Михалычев, А. Б., Могилевцев, Д. С., Килин, С. Я. Методы когерентной и некогерентной защиты неклассических состояний оптического поля, генерируемых нелинейными когерентными потерями // IV Конгресс физиков Беларуси: Сборник научных трудов. — Мн. : Ковчег, 2013. — С. 145—146.

39. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single-qubit laser — a source of non-classical light for quantum information applications // ICONO/LAT-2013 Technical Digest. Vol. ICONO-04: Quantum Physics, Information and Technologies. — 2013. — P. 39–40.

40. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Long and intermediate-distance qudit-type optical entanglement by means of weak local cross-Kerr nonlinearity // ICONO/LAT-2013 Technical Digest. Vol. ICONO-04: Quantum Physics, Information and Technologies. — 2013. — P. 47–48.

41. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Measurement-enhanced optical qudit-type entanglement at long and intermediate distances // QIM-2014, OSA Technical Digest. — 2014. — QTu2B.6.

42. Михалычев, А. Б. Усиление перепутанности на основе измерения для квантовой коммуникации на больших и средних расстояниях // Сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». — Мн., 2014. — С. 15—20.

43. Карусейчик, И. Л., Михалычев, А. Б. Реализация нелинейных когерентных потерь в системах с обратной связью и коррелированными по-

терями // Сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». — Мн., 2014. — С. 42—46.

44. Сакович, А. А., Михалычев, А. Б. Создание неклассических оптических состояний в системах с нелинейными когерентными потерями и периодическим возбуждением // Сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». — Мн., 2014. — С. 52—56.

45. Моделирование инструментальной функции для задач рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения / А. Б. Михалычев, А. И. Бенедиктович, Т. А. Ульяненкова, А. П. Ульяnenков // Сборник материалов Седьмого международного научного семинара и Пятой международной научной молодежной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». — 2015. — С. 151—154.

46. Карусейчик, И. Л., Михалычев, А. Б. Метод создания неклассических оптических состояний на основе усиления перепутанности и применения квантовых повторителей // Сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». — Мн., 2016. — С. 46—51.

47. Реут, В. С., Михалычев, А. Б. Выбор оптимальных наборов базисных состояний в томографии паттернов данных для одно- и двухмодовых оптических квантовых состояний // Сборник научных трудов Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики». — Мн., 2016. — С. 52—57.

48. Михалычев, А. Б., Ульяnenков, А. П. Байесовский подход к идентификации фаз в порошковой дифрактометрии // Сборник материалов Восьмого международного научного семинара и Шестой международной научной молодежной школы-семинара «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». — 2016. — С. 127—130.

49. Mikhalychev, A., Benediktovitch, A., Ulyanenko, A. Simulation of resolution effects in HRXRD by semi-analytical ray-tracing // Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology : XTOP-2016 Materials. — 2016. — Vol. 23, no. 2. — P. 320—321.

50. Misfit dislocation density determination at relaxation onset: reciprocal space map analysis of thin SiGe/Si layers / A. Benediktovitch, T. Ulyanenkova, A. Mikhalychev, V. M. Kaganer, M. Myronov, A. Ulyanenko // Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology : XTOP-2016 Materials. — 2016. — Vol. 23, no. 2. — P. 275—276.

51. Mikhalychev, A. B., Karuseichyk, I. L., Kilin, S. Y. Weak local cross-Kerr nonlinearity and linear optical “elimination” measurements as a resource for quantum state engineering // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, вып. 6—16. — С. 38.
52. Sakovich, A. A., Mikhalychev, A. B. Nonclassical states generation in a system with non-ideal nonlinear coherent loss and pulse coherent pump // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, вып. 6—16. — С. 42.
53. Reut, V. S., Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S. Analysis of applicability of different basis sets in data pattern tomography for single- and double-mode optical quantum states // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, вып. 6—16. — С. 40.
54. Karuseichyk, I. L., Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Method of long- and medium-distance entanglement generation by using optical “elimination” measurements // Журнал прикладной спектроскопии. — 2016. — Т. 83, вып. 6—16. — С. 33.
55. Iterative approach to quantum imaging using higher-order correlation functions / V. S. Reut, A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseychik, A. A. Sakovich, B. Bessire, M. Unternährer, A. Stefanov, D. S. Mogilevtsev // QIM-2017, OSA Technical Digest. — 2017. — QT6A.13.
56. Reut, V. S., Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S. Data pattern tomography of entangled states // QIM-2017, OSA Technical Digest. — 2017. — QT6A.34.
57. Shaping field correlation with entangled quantum antennas / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, G. Ya. Slepian, G. Buchs, D. L. Boiko, A. Boag // Posters of International Conference on Quantum Technologies. Vol. 1. — 2017. — P. 5.
58. Shaping field correlation with entangled quantum antennas / A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, I. Karuseichyk, G. Buchs, D. Boiko, G. Y. Slepian, A. Boag // International conference on microwave, communications, antennas and electronic systems (IEEE COMCAS 2017). — 2017. — P. 1–3.
59. Quantum antennas: designing states for field correlations / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, G. Buchs, D. Boiko, G. Y. Slepian, A. Boag // Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства : Материалы 6-й научной конференции. — 2017. — С. 27–31.
60. Информационный подход к оптимизации ширины корреляции источника в схеме квантового имаджинга / И. Л. Карусейчик, А. Б. Михалычев, А. А. Сакович, Д. С. Могилевцев // VIII Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» : Сборник научных трудов. — Мн., 2018. — С. 31–35.
61. Применение информации Фишера к задаче о квазилокальной ите-

ративной реконструкции изображения неизвестного объекта / А. А. Сакович, А. Б. Михалычев, И. Л. Карусейчик, Д. С. Могилевцев // VIII Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» : Сборник научных трудов. — Мн., 2018. — С. 55—60.

62. Сверхразрешающая микроскопия при измерении корреляционных функций света с точки зрения информации Фишера / А. А. Сакович, А. Б. Михалычев, И. Л. Карусейчик, Д. С. Могилевцев // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». — 2018. — С. 108—110.

63. Coherent diffusive photonics for generation of non-classical states / A. V. Mikhalychev, A. Sakovich, M. Thornton, D. Mogilevtsev, N. Korolkova // Frontiers of Nonlinear Physics : Proceedings. — 2019. — P. 247–248.

64. Exploiting Fisher information for constructing an efficient nonlinear optimization scheme for quantum imaging / A. Sakovich, A. Mikhalychev, I. Karuseichyk, D. Mogilevtsev // Imaging and Applied Optics 2019 (COSI, IS, MATH, pcAOP), OSA Technical Digest. — 2019. — MW3D.4.

65. Biased estimate for superresolving quantum imaging / A. Mikhalychev, I. Karuseichyk, A. Sakovich, P. Novik, D. Mogilevtsev // QIM V Quantum Information and Measurement: Quantum Technologies. — 2019. — P. 34.

66. Toward classical emulation of quantum states with coherent mixtures / A. Mikhalychev, Y. S. Teo, H. Jeong, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // International conference on microwave, communications, antennas and electronic systems (IEEE COMCAS 2021). — 2021. — P. 459–460.

67. Галковский, М. Ю., Михалычев, А. Б., Могилевцев, Д. С. Сверхразрешающая оптическая флуктуационная микроскопия: модификация метода путем предварительной обработки входных данных // X Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» : Сборник научных трудов. — Мн., 2022. — С. 13—16.

68. Жевно, К. И., Михалычев, А. Б. Информация Фишера для оптимизации и планирования измерений в рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения // X Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» : Сборник научных трудов. — Мн., 2022. — С. 21—24.

69. Применение методов машинного обучения для оптимизации обработки данных сверхразрешающей микроскопии / К. И. Жевно, А. Б. Михалычев, С. В. Власенко, Д. С. Могилевцев // X Международная школа-конференция молодых учёных и специалистов «Современные проблемы физики» : Сборник научных трудов. — Мн., 2022. — С. 25—27.

Тезисы докладов

70. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Continuous variable entanglement creation by means of small cross-Kerr nonlinearity // XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Vilnius, Sept. 20–23, 2008). — Minsk, 2008. — P. 26.

71. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Qudit-type entanglement of continuous entanglement via weak cross-Kerr nonlinearity // XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Kyiv, May 28–June 1, 2010). — Minsk, 2010. — P. 12–13.

72. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Nonlinear coherent loss // Первая международная конференция «Междисциплинарные исследования и технологии будущего» : Сборник тезисов и программа (Минск, 16–18 мая 2011). — Мн., 2011. — С. 59.

73. Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S., Kilin, S. Y. Nonlinear coherent loss for generating non-classical states // International Conference on Quantum Information and Measurement : Book of abstracts (Berlin, Germany, Mar. 19–21, 2012). — 2012. — JT2A.15.

74. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single-qubit laser: generation of nonlinear coherent states // International Conference on Quantum Information and Measurement : Book of abstracts (Berlin, Germany, Mar. 19–21, 2012). — 2012. — QW3B.1.

75. Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S., Kilin, S. Y. Generation of non-classical states by nonlinear loss and coherent or incoherent pump // Central European Workshop on Quantum Optics : Book of abstracts (Sinaia, Romania, June 2–6, 2012). — 2012. — P. 69.

76. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Dynamics and non-classicality of single-atom laser // Central European Workshop on Quantum Optics : Book of abstracts (Sinaia, Romania, June 2–6, 2012). — 2012. — P. 13–14.

77. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Long and intermediate-distance qudit-type optical entanglement by means of weak local cross-Kerr nonlinearity // ICONO/LAT-2013 : Conference Program and Book of Abstracts (Moscow, Russia, July 20–24, 2013). — 2013. — P. 127.

78. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single-qubit laser — a source of non-classical light for quantum information applications // ICONO/LAT-2013 : Conference Program and Book of Abstracts (Moscow, Russia, July 20–24, 2013). — 2013. — P. 123.

79. Kilin, S. Y., Mikhalychev, A. B. Single qubit single mode laser — an ultimate type of micro lasers // MPLP-2013 Symposium : Program and Book of Abstracts (Novosibirsk, Russia, Aug. 25–31, 2013). — 2013. — P. 52–

53.

80. Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Measurement-enhanced optical qudit-type entanglement at long and intermediate distances // International Conference on Quantum Information and Measurement : Book of abstracts (Berlin, Germany, Mar. 18–20, 2014). — 2014. — P. 15.

81. Михалычев, А. Б. Усиление перепутанности на основе измерения для квантовой коммуникации на больших и средних расстояниях // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» : Программа и краткие тезисы докладов (Минск, Беларусь, 11–13 июня 2014). — 2014. — С. 3.

82. Карусейчик, И. Л., Михалычев, А. Б. Реализация нелинейных когерентных потерь в системах с обратной связью и коррелированными потерями // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» : Программа и краткие тезисы докладов (Минск, Беларусь, 11–13 июня 2014). — 2014. — С. 13.

83. Сакович, А. А., Михалычев, А. Б. Создание неклассических оптических состояний в системах с нелинейными когерентными потерями и периодическим возбуждением // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» : Программа и краткие тезисы докладов (Минск, Беларусь, 11–13 июня 2014). — 2014. — С. 14.

84. Ab initio simulation of diffractometer instrumental function for HRXRD / A. Mikhalychev, A. Benediktovitch, T. Ulyanenkova, A. Ulyanekov // The 12th Biennial Conference on High-Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (ХТОР 2014) : Book of Abstracts (Villard-de-Lans, France, Sept. 14–19, 2014). — 2014. — P. 152.

85. Bayesian adaptive data pattern tomography / A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, Y. S. Teo, J. Rehacek, Z. Hradil // XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Minsk, Belarus, Oct. 27–30, 2015). — 2015. — P. 26.

86. Karuseichik, I. L., Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Analysis of optical states, created by means of small cross-Kerr nonlinearities and probabilistic entanglement enhancement // XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Minsk, Belarus, Oct. 27–30, 2015). — 2015. — P. 45–46.

87. Reut, V. S., Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S. Representation of quantum states of electromagnetic field using discrete basis of coherent projectors // XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Minsk, Belarus, Oct. 27–30, 2015). — 2015. — P. 51.

88. Sakovich, A. A., Mikhalychev, A. B. Periodic coherent pump as nonclassicality protector in the systems with nonlinear coherent loss and linear dissipation // XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Programme and book of abstracts (Minsk, Belarus, Oct. 27–30, 2015). — 2015. — P. 51–52.

89. Карусейчик, И. Л., Михалычев, А. Б. Метод создания неклассических оптических состояний на основе усиления перепутанности и применения квантовых повторителей // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» : Программа и краткие тезисы докладов (Минск, Беларусь, 8–10 июня 2016). — 2016. — С. 14.

90. Реут, В. С., Михалычев, А. Б. Выбор оптимальных наборов базисных состояний в томографии паттернов данных для одно- и двухмодовых оптических квантовых состояний // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» : Программа и краткие тезисы докладов (Минск, Беларусь, 8–10 июня 2016). — 2016. — С. 15.

91. Mikhalychev, A., Ulyanekov, A. Bayesian approach to phase identification from powder diffraction data // The European Powder Diffraction Conference : Book of abstracts (Italy, Bari, June 12–15, 2016). — Bari, 2016. — P. 56.

92. X-ray diffraction analysis of misfit dislocations in SiGe/Si thin layers: the role of finite thickness on dislocation induced peak shape / A. Benediktovich, A. Mikhalychev, T. Ulyanenkova, M. Myronov, V. M. Kaganer, A. Ulyanekov // The European Powder Diffraction Conference : Book of abstracts (Italy, Bari, June 12–15, 2016). — Bari, 2016. — P. 155.

93. Mikhalychev, A. B., Karuseichyk, I. L., Kilin, S. Y. Weak local cross-Kerr nonlinearity and linear optical “elimination” measurements as a resource for quantum state engineering // ICONO/LAT-2016 : Book of Abstracts. “Quantum and Atom Optics” (Minsk, Belarus, Sept. 26–30, 2016). — 2016. — P. 39.

94. Sakovich, A. A., Mikhalychev, A. B. Nonclassical states generation in a system with non-ideal nonlinear coherent loss and pulse coherent pump // ICONO/LAT-2016 : Book of Abstracts. “Quantum and Atom Optics” (Minsk, Belarus, Sept. 26–30, 2016). — 2016. — P. 60.

95. Reut, V. S., Mikhalychev, A. B., Mogilevtsev, D. S. Analysis of applicability of different basis sets in data pattern tomography for single- and double-mode optical quantum states // ICONO/LAT-2016 : Book of Abstracts. “Quantum and Atom Optics” (Minsk, Belarus, Sept. 26–30, 2016). — 2016. — P. 64.

96. Karuseichyk, I. L., Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Method of long- and medium-distance entanglement generation by using optical "elimination" measurements // ICONO/LAT-2016 : Book of Abstracts. "Quantum and Atom Optics" (Minsk, Belarus, Sept. 26–30, 2016). — 2016. — P. 68.
97. Near-field twin-photon imaging by higher-order correlation functions / A. Mikhalychev, B. Bessire, M. Unternährer, I. Karuseichyk, A. Sakovich, V. Reut, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // XIV Asia-Pacific Conference & Workshop on Quantum Information Science : Book of Abstracts (Baku, Azerbaijan, Dec. 4–9, 2016). — 2016. — P. 5.
98. Quantum correlations for super-resolving quantum imaging / A. Mikhalychev, I. Karuseichyk, A. Sakovich, B. Bessire, M. Unternährer, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, Nov. 20–23, 2017). — 2017. — P. 51.
99. Karuseichik, I. L., Mikhalychev, A. B., Kilin, S. Y. Quantum design of entangled optical states in non-ideal systems with state control via measurements // XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, Nov. 20–23, 2017). — 2017. — P. 12.
100. Novik, P., Mikhalychev, A. Detection of non-stationarities in quantum tomography by correlation of measurement results // XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, Nov. 20–23, 2017). — 2017. — P. 15–16.
101. Iterative image reconstruction by means of entangled photons correlation function measurement / A. Sakovich, A. Mikhalychev, I. Karuseichyk, B. Bessire, M. Unternährer, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, Nov. 20–23, 2017). — 2017. — P. 17–19.
102. Synthesis of quantum antennas for shaping field correlations / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, D. Mogilevtsev, G. Ya. Slepyan, G. Buchs, D. L. Boiko, A. Boag // Book of abstract. Workshop on Fundamental and applied nanoelectromagnetics-II (Minsk, Belarus, June 5–7, 2018). — 2018. — P. 43.
103. Quantum imaging resolution increase via radiation source optimization / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. Sakovich, D. Mogilevtsev // Book of Abstracts, Quantum Technology International Conference (Paris, France, Sept. 5–7, 2018). — 2018. — P. 8.
104. Mikhalychev, A., Lappo, N., Ulyanenko, A. Bayesian approach to automatic mass spectrum peak identification in atom probe tomography // XXII International Mass Spectrometry Conference : Abstract Book (Florence,

Italy, Aug. 26–31, 2018). — 2018. — P. 1229.

105. Optimal coherence width for imaging with pseudo-thermal light / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. Sakovich, D. Mogilevtsev // 62nd International conference for students of physics and natural sciences Open Readings 2019 Abstract book (Vilnius, Lithuania, Mar. 19–22, 2019). — 2019. — P. 355.

106. Optimal correlation width for quantum imaging / I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. Sakovich, D. Mogilevtsev // XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, May 13–17, 2019). — 2019. — P. 49–51.

107. Superresolving quantum imaging: going beyond Cramer-Rao bound due to constraints / P. I. Novik, A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseichyk, A. A. Sakovich, D. S. Mogilevtsev // XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, May 13–17, 2019). — 2019. — P. 60–62.

108. Quantum imaging with single photon detector arrays / A. Stefanov, M. Unternährer, B. Bessire, L. Gasparini, M. Perenzoni, A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseichyk, A. A. Sakovich, D. Mogilevtsev // XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, May 13–17, 2019). — 2019. — P. 134–135.

109. Fisher information: a practical tool for optimizing quantum imaging / A. Mikhalychev, I. Karuseichyk, A. Sakovich, B. Bessire, M. Unternährer, A. Stefanov, D. Mogilevtsev // XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information : Book of abstracts and program (Minsk, Belarus, May 13–17, 2019). — 2019. — P. 139–140.

110. Bayesian approach to automatic recognition of ion patterns in mass spectra / A. Ulyanekov, A. Mikhalychev, S. Vlasenko, I. Perapechka // Pittcon Conference & Expo (PITTCO 2019) Book of Abstracts (Philadelphia, USA, Mar. 17–21, 2019). — 2019. — P. 2110–17.

111. Automatic mass spectrum peak labeling by maximal likelihood estimate in atom probe tomography / A. Ulyanekov, A. Mikhalychev, N. Lappo, S. Vlasenko // 2019 MRS Spring Meeting & Exhibit (MRS Spring 2019) : Program and Book of Abstracts (Phoenix, USA, Apr. 22–26, 2019). — 2019. — P. 132.

112. Non-coplanar high-resolution X-ray diffraction to study novel materials / A. Ulyanekov, A. Mikhalychev, A. Benediktovitch, T. Ulyanekova, S. Vlasenko, J. Keckes, M. Myronov, V. Kaganer, G. Abadias, J. O'Connell, A. J. van Vuuren // Advanced Nanomaterials and Methods ANAM-2019 Abstract Book (Yerevan, Armenia, Sept. 25–Oct. 2, 2019). — 2019. — P. 28–30.

113. SPAD arrays for quantum imaging / A. Stefanov, B. Bessire, M. Unternährer, B. Eckmann, L. Gasparini, M. Perenzoni, D. Lyakhov, D. L. Michels,

I. Karuseichyk, A. Mikhalychev, A. Sakovich, D. Mogilevtsev // Quantum Technology International Conference 2020 Book of Abstracts (Online, Nov. 2–4, 2020). — 2020. — P. 182.

114. Can super-resolution optical fluctuation imaging (SOFI) provide infinite resolution? / A. Mikhalychev, S. Vlasenko, I. Karuseichyk, D. Lyakhov, D. L. Michels, D. Mogilevtsev // Quantum Technology International Conference 2020 Book of Abstracts (Online, Nov. 2–4, 2020). — 2020. — P. 189.

115. Ulyanenkova, A., Mikhalychev, A. Artificial intelligence for efficient analytical processing of X-ray diffraction data // 2021 MRS Spring Meeting Book of Abstracts (Online, Apr. 23–17, 2021). — 2021. — P. 47.

116. Engineered correlated loss for an integrated source of photon pairs with 100 dB pump self-rejection / P. de la Hoz, A. Sakovich, A. Mikhalychev, M. Thornton, N. Korolkova, D. Mogilevtsev // CLEO/EUROPE-EQEC 2021 Technical digest (Online, June 21–25, 2021). — 2021. — EA-P–9.

117. Information analysis for quantum imaging optimization / A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseichyk, S. V. Vlasenko, B. Bessire, D. A. Lyakhov, D. L. Michels, A. Stefanov, D. S. Mogilevtsev // CLEO/EUROPE-EQEC 2021 Technical digest (Online, June 21–25, 2021). — 2021. — EB-P–9.

118. Machine learning for optimization of optical super-resolution microstructure analysis / A. Ulyanenkova, A. Mikhalychev, K. Zhevno, S. Vlasenko, D. Mogilevtsev // 2021 MRS Fall Meeting Book of Abstracts (Online, Dec. 6–8, 2021). — 2021. — P. 105.

РЕЗЮМЕ

Михалычев Александр Борисович

КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ И СОЗДАНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

квантовая метрология, квантовая микроскопия, квантовая томография, квантовое измерение, редукция состояния, неунитарная динамика, неклассическое квантовое состояние, перепутанное квантовое состояние, метод паттернов данных, когерентное состояние, байесовский подход, информация Фишера, рентгеновская дифрактометрия, ионная масс-спектрометрия, одноатомный лазер

Целью исследования является разработка методов использования квантовых измерений для управления квантовыми состояниями оптических полей и получения информации о таких состояниях при осуществлении квантовой томографии, метрологии и микроскопии. **Методом исследования** является операторное описание унитарной и неунитарной динамики квантовых систем и анализ статистики случайных квантовых процессов с использованием информации Фишера и теоремы Байеса. Получены следующие **новые научные результаты**. Разработан метод вероятностного управления квантово-оптическими состояниями путем измерения и построено операторное описание сопутствующих преобразований квантовых состояний. Определены условия эффективной генерации неклассических и перепутанных состояний при неунитарном управлении квантовыми состояниями в «фотонной пушке» на основе связанных нелинейных волноводов и одноатомном лазере. Развита метод паттернов данных для повышения эффективности создания, реконструкции и эмуляции квантовых состояний. Предложен информационный подход к анализу, оптимизации и количественному описанию оптического разрешения в квантовой микроскопии. Проведено обобщение разработанных методов описания и оптимизации квантовых измерений на обработку результатов классических измерений рентгеновской дифрактометрии и ионной масс-спектрометрии. Полученные результаты могут **применяться** для практической реализации методов квантовой передачи, обработки и защиты информации; повышения точности и эффективности диагностики квантовых состояний и их использования в задачах квантовой микроскопии и метрологии.

РЭЗЬЮМЭ

Міхалычаў Аляксандр Барысавіч

КВАНТАВЫЯ ВЫМЯРЭННІ ДЛЯ МЕТРАЛОГІІ І СТВАРЭННЯ НЕКЛАСІЧНЫХ СТАНАЎ

квантавая метралогія, квантавая мікраскапія, квантавая тамаграфія, квантавае вымярэнне, рэдукцыя стану, неўнітарная дынаміка, некласічны квантавы стан, пераблытаны квантавы стан, метада патэрнаў дадзеных, кагерэнтны стан, байесаўскі падыход, інфармацыя Фішэра, рэнтгенаўская дыфрактаметрыя, іённая мас-спектраметрыя, аднаатамны лазер

Мэтай даследвання з'яўляецца распрацоўка метадаў выкарыстання квантавых вымярэнняў для кіравання квантавымі станамі аптычных палей і атрымання інфармацыі пра такія станы пры ажыццяўленні квантавай тамаграфіі, метралогіі і мікраскапіі. **Метадам даследвання** з'яўляецца апэратарнае апісанне ўнітарнай і неўнітарнай дынамікі квантавых сістэм і аналіз статыстыкі выпадковых квантавых працэсаў з выкарыстаннем інфармацыі Фішэра і тэарэмы Байеса. Атрыманы наступныя новыя навуковыя **вынікі**. Распрацаваны метада верагоднаснага кіравання квантава-аптычнымі станамі шляхам вымярэння і пабудавана апэратарнае апісанне спадарожных ператварэнняў квантавых станаў. Вызначаны ўмовы эфектыўнай генерацыі некласічных і пераблытаных станаў пры неўнітарна кіраванні квантавымі станамі ў «фатоннай гармаце» на аснове звязаных нелінейных хваляводаў і аднаатамным лазера. Развіты метада патэрнаў дадзеных для павышэння эфектыўнасці стварэння, рэканструкцыі і эмуляцыі квантавых станаў. Прапанаваны інфармацыйны падыход да аналізу, аптымізацыі і колькаснага апісання аптычнага распазнавання ў квантавай мікраскапіі. Праведзена абагульненне распрацаваных метадаў апісання і аптымізацыі квантавых вымярэнняў на апрацоўку вынікаў класічных вымярэнняў рэнтгенаўскай дыфрактаметрыі і іённай мас-спектраметрыі. Атрыманыя вынікі могуць **выкарыстоўвацца** для практычнай рэалізацыі метадаў квантавай перадачы, апрацоўкі і абароны інфармацыі; павышэння дакладнасці і эфектыўнасці дыягностыкі квантавых станаў і іх выкарыстання ў задачах квантавай мікраскапіі і метралогіі.

SUMMARY

Mikhalychev Alexander

QUANTUM MEASUREMENTS FOR METROLOGY AND NONCLASSICAL STATES GENERATION

quantum metrology, quantum imaging, quantum tomography, quantum measurement, state reduction, non-unitary dynamics, nonclassical quantum state, entangled quantum state, data-pattern method, coherent state, Bayesian approach, Fisher information, X-ray diffractometry, ion mass-spectrometry, single-atom laser

The aim of research is development of methods for exploiting quantum measurements for controlling quantum states of optical fields and getting information about such states during implementation of quantum tomography, metrology, and imaging. **The method of research** is operator-based description of unitary and non-unitary dynamics of quantum systems and analysis of random quantum processes' statistics by means of Fisher information and Bayes theorem. The following novel **results** have been obtained. A method for probabilistic control of quantum-optical states by measurement is developed, and operator-based description of accompanying transformations of quantum states is constructed. The conditions for efficient nonclassical and entangled states generation by non-unitary control of quantum states in a "photonic gun", formed by coupled nonlinear waveguides, and a single-atom laser are determined. The data-pattern method for increasing the efficiency of generation, reconstruction, and emulation of quantum states is developed. Information approach to analysis, optimization, and quantification of optical resolution in quantum imaging is proposed. The developed methods fro describing and optimizing quantum measurements are generalized for processing results of classical measurements in X-ray diffractometry and ion mass-spectrometry. The obtained results can be **applied** to practical implementation of methods for quantum information transfer, processing, and protection; for increase of accuracy and efficiency of quantum states diagnostics and their exploitation in quantum imaging and metrology.

МИХАЛЫЧЕВ АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

КВАНТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ МЕТРОЛОГИИ И СОЗДАНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика

Подписано в печать “ ” 2023 г. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага - офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3.0
Учетн. изд. л. 2.4. Тираж 60 экз. Заказ № 4

Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2.
Отпечатано на ризографе Института физики имени Б. И. Степанова НАН
Беларуси, лицензия ЛП № 20 от 27.05.2003 г.