

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Шараповой Полины Родионовны “Квантовые корреляции и перепутывание в неклассических состояниях света и атомных системах, взаимодействующих с ними”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.05 – Оптика

Кандидатская диссертация Шараповой П.Р. посвящена теоретическому исследованию пространственных корреляций фотонов в ярких сжатых состояниях света, а также исследованию динамики и квантовых корреляций, возникающих в атомно-полевой системе, когда электромагнитное поле находится в неклассических состояниях.

Актуальность таких исследований не вызывает сомнений. В последнее время растёт число работ, посвящённых экспериментальному изучению макроскопических квантовых состояний света, таких как яркий сжатый вакуум, поскольку все больше осознаются перспективы использования этих состояний для решения целого ряда практических задач. Среди последних можно отметить повышение точности интерференционных измерений, повышение пространственного разрешения квантовых изображений и квантовой литографии, а также реализацию перспективных протоколов квантовой связи и квантовых вычислений. Дальнейший прогресс в этой области невозможен без развития адекватного теоретического описания макроскопических квантовых состояний света, выходящего за рамки теории возмущений. Кроме того, актуальной задачей является развитие теории взаимодействия таких неклассических полей с атомными системами, позволяющей развивать методы приготовления стабильных и сильно перепутанных состояний. Именно этим потребностям и отвечают задачи, решаемые в диссертационной работе.

Научная и практическая значимость диссертации связана с тем, что полученные в ней теоретические результаты способствуют расширению области применения многомодовых сжатых состояний и развитию методов приготовления стабильных и сильно перепутанных состояний в системе «атом + поле». В частности, разработанный метод получения гигантского усиления сигнала параметрического рассеяния в анизотропном кристалле имеет большое практическое значение для создания ярких источников неклассического света, а предложенный метод создания стабильного атомного состояния с высокой степенью перепутанности при взаимодействии неклассического света с ридберговским атомом может быть использован для разработки новых протоколов квантовой обработки информации.

Достоверность положений и результатов диссертации обеспечивается использованием в работе апробированных теоретических методов и хорошим согласием теоретических расчётов с экспериментальными данными. Все результаты имеют простое качественное объяснение в рамках известных физических моделей квантовой оптики.

Новизна проведённых исследований и полученных результатов заключается в следующем:

- разработана последовательная аналитическая теория, описывающая пространственные свойства и корреляции фотонов в ярких сжатых состояниях света, генерируемых в процессах параметрического рассеяния или четырёхволнового смешения;
- продемонстрировано изменение пространственных корреляционных свойств сжатого вакуума с ростом коэффициента параметрического усиления; показана возможность создания пространственно одномодового источника сжатого света в схеме нелинейного усиления с двумя кристаллами;
- продемонстрировано гигантское усиление нелинейного сигнала за счёт эффекта пространственного сноса в анизотропном кристалле;
- исследована динамика ионизации ридберговского атома при его взаимодействии с неклассическим светом в состоянии сжатого вакуума. Обнаружен эффект стабилизации и показана возможность достижения высокой степени перепутанности между атомной и полевой системой;
- показана возможность создания стабильного и сильно перепутанного состояния при взаимодействии ридберговского атома с однофотонным состоянием поля; разработаны методы достижения максимальной перепутанности в системе «атом + поле».

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 150 страниц машинописного текста, она включает 38 рисунков и список цитируемой литературы из 107 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертации, формулируются цель работы, круг решаемых в ней задач и защищаемые положения. Представлена также структура работы и приведён список докладов по материалам диссертации, сделанных на международных конференциях и симпозиумах.

В первой главе дан обзор результатов теоретических исследований неклассических состояний света, имеющих непосредственное отношение к теме работы. Основное внимание уделено вопросам теоретического описания ярких сжатых состояний, генерируемых при высоких значениях коэффициента параметрического усиления, а также особенностям теоретического описания атомно-полевой системы в случае сильной связи и



неклассических состояний поля. Подробно рассмотрено явление интерференционной стабилизации ридберговского атома, взаимодействующего с полем в различных квантовых состояниях.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию пространственных корреляционных свойств яркого сжатого вакуума. Разработан теоретический подход, основанный на разложении Шмидта амплитуды бифотонного состояния и диагонализации гамильтониана в базисе мод Шмидта, с использованием которого предсказаны новые эффекты, такие как генерация высокоинтенсивного излучения в анизотропном кристалле за счёт эффекта пространственного сноса, выделение одной пространственной моды в нелинейном интерферометре с двумя разделёнными нелинейными кристаллами, уменьшение числа мод при увеличении параметрического коэффициента усиления. Все полученные теоретические закономерности находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов, выполненных в группе профессора М.В. Чеховой (Институт Макса Планка, Эрланген, Германия).

В третьей главе теоретически исследуются динамические и корреляционные свойства системы, состоящей из ридберговского атома и электромагнитного поля, находящегося в различных квантовых состояниях (сжатый вакуум, когерентное состояние, однофотонное состояние). Используемая модель ридберговского атома учитывает как дискретные уровни, так и континуум, соответствующий ионизации. Показано, в частности, что при взаимодействии атома с полем в состоянии сжатого вакуума наблюдается эффект интерференционной стабилизации по отношению к ионизации, возникновение которого не зависит от исходной разности фаз ридберговских состояний. Для случая однофотонного состояния поля разработаны методы эффективного заселения стабильного состояния, позволяющие достичь высокой степени перепутанности между атомной и полевой подсистемами. Рассмотрена эволюция ридберговского атома в смешанное состояние при взаимодействии с квантовым полем, содержащим несколько фотонов. Показано, что измерение вероятности ионизации такого атома при взаимодействии с классическим полем позволяет восстановить исходную матрицу плотности атома в базисе Шмидта и вычислить степень перепутанности между атомом и квантовым полем.

Оценивая работу в целом, следует отметить следующее. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Все защищаемые научные положения и выводы хорошо обоснованы. Работа выполнена на высоком научном уровне и характеризуется



необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. Среди последних хочется выделить генерацию высокоинтенсивного излучения за счёт эффекта пространственного сноса. По сравнению с режимом коллинеарного синхронизма интенсивность параметрического рассеяния возрастает на два-три порядка. Данный результат, несомненно, будет способствовать появлению перспективных приложений состояний яркого сжатого вакуума в таких областях, как квантовая метрология и квантовая криптография. Следует также отметить методическую целостность работы. Все результаты второй главы получены с использованием развитого в работе теоретического подхода, основанного на разложении Шмидта, который позволил аналитически проанализировать пространственные корреляционные свойства яркого сжатого вакуума. Анализ квантовых корреляций в атомно-полевой системе, выполненный в третьей главе, также основан на разложении Шмидта, а все расчёты выполнены в формализме одетых состояний.

В то же время диссертация не свободна от недостатков:

1. Объяснение зависимостей, приведённых на рис. 2.1 (стр. 44), представляется справедливым только в случае большого числа мод Шмидта, когда можно ожидать, что угловая ширина корреляционных провалов и их положение не связаны со структурой самих мод. В данном же случае, эффективное число мод равно 1.9 и более правильным представляется объяснение в терминах корреляций, возникающих в рамках двух мод Шмидта: гауссовой первой и двухпиковой второй. С этой точки зрения требуются дополнительные пояснения.
2. В разделе 3.1.4 на стр. 94 параметр Шмидта вводится для подсистемы, пространство состояний которой натягивается на связанные состояния атома. Таким образом, этот параметр Шмидта характеризует перепутанность данной подсистемы не только с полем, но и с континуумом. Он характеризует перепутанность только с полем, если вероятность ионизации равна нулю. Поэтому утверждение, что увеличение параметра Шмидта при взаимодействии с когерентным полем выявляет неклассические черты данного состояния поля (стр. 99), представляется неочевидным.
3. В разделе 3.1.1 при описании модельной системы «атом+поле» не хватает диаграммы энергетических уровней, иллюстрирующих возможные переходы в лямбда и V схемах с участием континуума.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают научной значимости диссертации. По теме диссертации опубликовано 7 работ в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, а полученные результаты

неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационное исследование Шараповой П.Р. “Квантовые корреляции и перепутывание в неклассических состояниях света и атомных системах, взаимодействующих с ними” соответствует всем требованиям ВАК РФ, а её автор – Шарапова Полина Родионовна, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук,

временно исполняющий обязанности директора

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского

Казанского научного центра РАН

Адрес: 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7

Эл. почта: [a.a.kalachev@mail.ru](mailto:a.a.kalachev@mail.ru), раб. тел. (843)2720503



А.А.Калачев

