

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Чиркина Анатолия Степановича о диссертационной работе Захарова Романа Викторовича «Управление свойствами и корреляциями фотонов неклассического сжатого света», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Тема рецензируемой диссертационной работа связана с квантовыми сжатыми состояниями. Первоначальный интерес к ним был вызван гравитационно-волновыми экспериментами. Квантовые сжатые состояния дают возможность понизить уровень шума при регистрации ниже стандартного квантового предела. Это обстоятельство в значительной мере способствовало интенсивному и экстенсивному развитию квантовой оптики в последние 40 лет. В настоящее время акцент квантово-оптических исследований смещён в область квантовых вычислений и квантовой связи. Расширение области применения квантовых состояний света привело вместе с тем к необходимости переосмысления ранее полученных результатов с точки зрения их конкретного использования и улучшения модели изучаемого процесса. В этом отношении тема диссертационной работы является безусловно актуальной. В ней последовательно разрабатывается анализ ярких, многомодовых квадратурно-сжатых состояний света, формируемого при оптических параметрических взаимодействиях, в формализме мод Шмидта.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Полный объём диссертации составляет 149 страниц и включает 72 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 178 наименований.

Первая глава содержит краткий обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Обсуждаются неклассические свойства сжатых состояний, методы их описания и практическое применение. Однако в ней отсутствует упоминание о возможности получения сжатого света при самовоздействии, формировании поляризационно-сжатого света и классического сжатого света.

Вторая глава посвящена анализу модового состава и пространственных корреляций фотонов для состояний сжатого вакуума. Рассмотрено параметрическое рассеяние при вырожденном по частоте режиме и анализируется схема с двумя пространственно разнесенными нелинейными кристаллами. Продемонстрировано изменение пространственных профилей и весов мод Шмидта, характеризующих формируемый сжатый свет, в зависимости от относительного набега фаз между накачкой, сигнальными и холостыми фотонами. Показано, что можно управлять корреляциями фотонов по пространству за счет варьирования параметров схемы. Установлена сильная зависимость эффективного числа мод Шмидта от интенсивности накачки и продемонстрировано возможность выделения одной пространственной моды при больших коэффициентах параметрического усиления. Обсуждается вопрос выделения сжатого света в различных азимутальных каналах без потери корреляционных свойств фотонов.

В третьей главе изучены свойства неклассических сжатых состояний света, генерируемого в сильно невырожденном режиме параметрического взаимодействия, когда частота холостых фотонов принадлежит терагерцовому диапазону, а частота сигнальных фотонов – оптическому. Обсуждаются

особенности пространственной модовой структуры в этом случае. На основе системы, состоящей из двух нелинейных кристаллов, разделенных линейной средой, предложен метод по измерению показателя преломления линейных сред в терагерцовом диапазоне частот. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает высокую точность измерения дисперсионных характеристик сред за счет использования частотно-угловых корреляций оптических и терагерцовых фотонов. Рассмотрен также связанный процесс, в котором параметрический распад фотонов накачки сопровождается процессом генерации суммарной частоты. Обнаружены пространственные корреляции стоксовых и антистоксовых оптических фотонов, обусловленные вовлечением терагерцовых фотонов в оба параметрических процесса. Результаты этой главы представляют особый интерес для фантомной визуализации, поскольку позволяют облучать объект в терагерцовом диапазоне волн, а изображение восстанавливать в оптическом диапазоне.

В четвертой главе диссертации исследованы генерация и усиление многомодового неклассического сжатого света, характеризуемого широким пространственно-угловым распределением. Обсуждается проблема одновременного усиления большого числа пространственных мод с малым уровнем шума. Её решение требует реализации режима фазово-чувствительного усиления одновременно для всех мод. Рассмотрена двухкристаллическая схема, названная автором нелинейным интерферометром, которая обеспечивает фазово-чувствительное усиление по широкому угловому спектру. Установлено, что многомодовое сжатие в этом случае достигает -4.3 Дб с квазиоднородным распределением по пространству. Следует отметить, что обсуждаемая схема была реализована экспериментально, и результаты теории хорошо согласуются с данными эксперимента. Экспериментальное подтверждение получил также метод восстановления профилей мод Шмидта генерируемого сжатого вакуума и их весов из корреляционных измерений.

Пятая глава посвящена анализу взаимодействия неклассических полей с наносистемами. Рассмотрено взаимодействие двухмодового квантового поля со сверхпроводящими джозефсоновскими кубитами. Установлено, что при большой отстройке частот полевых мод от перехода в кубите возникает эффективная взаимосвязь полевых мод друг с другом. Данный режим позволяет осуществлять передачу фотонной статистики света от одной полевой моды к другой через нерезонансное взаимодействие с кубитом. Однако относительные фазы состояний передаются с искажениями и требуют коррекции. В процессе динамики такой составной системы было обнаружено формирование двухмодовых запутанных состояний, что может найти применение в практических приложениях в области квантовой информации.

Диссертационная работа Захарова Р.В. выполнена на высоком научном уровне. В ней получены важные новые результаты. Продемонстрировано управление модовым составом и корреляциями фотонов в двухкристаллической схеме за счет изменения режима усиления и расстояния между кристаллами. На основе частотно-угловых корреляций оптических и терагерцовых фотонов разработана схема высокоточного измерения дисперсионных характеристик сред в терагерцовом диапазоне частот. Продемонстрировано возникновение пространственных корреляций стоксовых и антистоксовых фотонов в процессах генерации суммарной и разностной частоты за счет их запутывания с терагерцовыми фотонами. Разработаны методы выделения и усиления различных пространственных мод неклассического сжатого света без потери корреляционных свойств фотонов. Разработаны ме-

тоды широкоугольного фазово-чувствительного усиления одновременно для большого числа мод сжатого света.

Одним из наиболее ярких результатов диссертационной работы является теоретически разработанный метод восстановления профилей мод Шмидта и их весов из экспериментально измеренным корреляциям. Следует отметить, что данный метод, реализованный экспериментально, продемонстрировал очень хорошее согласие теоретически предсказанных и экспериментально измеренных характеристик.

В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

- 1) Теоретическое описание квантового сжатого света в формализме коллективных мод Шмидта, что позволяет предсказать эффекты в непертурбативном режиме и корректно учесть корреляции большого числа фотонов друг с другом.
- 2) Получение аналитических выражений для ряда характеристик квантового сжатого света, измеряемых в эксперименте.
- 3) Разработка методов и схем, непосредственно реализованных в эксперименте, и хорошее согласие теоретических результатов с экспериментальными данными.

Полученные в работе результаты опубликованы в 9 статьях в рецензируемых научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладывались на специализированных международных научных конференциях.

Автореферат правильно отображает основное содержание диссертационной работы.

К работе имеется ряд замечаний, из которых отметим следующие:

- 1) Световые пучки с каким числом фотонов считаются яркими в работе?
- 2) В главе 3 рассмотрена параметрическая генерация фотонов с сильно отличающимися несущими частотами, принадлежащими к терагерцовому и оптическому диапазону длин волн. Для анализа в оптическом диапазоне можно использовать квазиоптическое приближение, а для терагерцового нельзя. Из текста работы не ясно, каким подходом пользовался автор.
- 3) Из текста работы также не ясно, какие типы параметрического взаимодействия анализировались, и в связи с этим учитывался ли так называемый эффект сноса в двулучепреломляющем кристалле.
- 4) На с.64 даётся ссылка на рис. 3.7 на интерферометр Маха-Цендера, на котором в действительности изображено последовательное расположение двух нелинейно-оптических кристаллов.
- 5) В подписях к рис. 3.15, 3.16 и 3.18 сказано о пространственном распределении сигнала, а оси координат соответствуют угловому распределению.

Перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация Р.В. Захарова является целостным научным исследованием, выполненным на высоком теоретическом уровне, имеющим высокую теоретическую и практическую значимость и содержащим новые решения актуальных задач. Считаю, что диссертация «Управление свойствами и корреляциями фотонов неклассического сжатого света» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «По-

ложения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Захаров Роман Викторович — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры общей физики и волновых процессов
физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Чиркин Анатолий Степанович

« 3 » декабря 2024 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-12-25

E-mail: aschirkin@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, г. Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись Чиркина Анатолия Степановича ЗАВЕРЯЮ:

Учёный секретарь ученого совета
физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., доцент

С.Ю. Стремоухов