

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента, чл.-корр. РАН Калачева Алексея Алексеевича 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

Диссертационная работа Р.В. Захарова посвящена теоретическому исследованию неклассических сжатых состояний света, разработке методов управления их пространственными, спектральными и корреляционными свойствами, а также методов фазово-чувствительного усиления оптических полей и преобразования квантовых состояний поля при взаимодействии его с кубитом.

Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений. Несмотря на то, что неклассические состояния электромагнитного поля, включая сжатые состояния, исследуются достаточно давно, в последние годы наблюдается существенный экспериментальный прогресс в области генерации ярких сжатых состояний света и генерации неклассических состояний поля в терагерцовом и микроволновом диапазонах. В результате открываются новые перспективы по использованию подобных неклассических состояний в квантовой метрологии, сенсорике, оптомеханике, квантовых коммуникациях и оптических квантовых вычислениях. При этом особое значение приобретает разработка новых теоретических подходов к описанию неклассических состояний поля, прежде всего многомодовых, а также разработка методов управления их свойствами, прежде всего корреляциями фотонов в различных модах. Именно этим потребностям и отвечают задачи, решаемые в диссертационной работе.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 149 страниц машинописного текста, включая 72 рисунка и список цитируемой литературы из 178 наименований.

**Во введении** раскрывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и решаемые задачи. Сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость. Приведена информация об апробации результатов.

**Первая глава** является обзорной и включает обсуждение таких вопросов как спонтанное параметрическое рассеяние, сжатый вакуум электромагнитного поля, формализм мод Шмидта, усиление оптических полей без добавления шума, взаимодействие квантового света с кубитами.

**Вторая глава** посвящена исследованию возможностей управления пространственными свойствами неклассических состояний света, генерируемых в процессе параметрического рассеяния в интерферометре из двух нелинейных кристаллов. Показана возможность управления модовым составом, в частности выделения одной пространственной моды, путем изменения отно-

сительной фазы взаимодействующих полей (сигнальное, холостое и поле накачки) в интерферометре. Предложен подход к подавлению нулевого азимутального канала, что важно с точки зрения подавления шумов в измерениях с использованием коррелированных пучков,

**Третья глава** посвящена разработке подходов к описанию генерации запутанных оптического и терагерцового пучков в сильно невырожденном режиме параметрического рассеяния за рамками теории возмущений. На основе интерферометра, состоящего из двух нелинейных кристаллов, разделенных линейной средой, предложена схема по измерению дисперсии среды в терагерцовом диапазоне, предполагающий детектирование только оптического излучения.

**В четвертой главе** исследуется генерация и усиление многомодового неклассического сжатого света, в частности проблема усиления большого числа пространственных мод с малым уровнем шума. Разработана теория широкоугольного нелинейного интерферометра, в котором было продемонстрировано многомодовое сжатие  $-4.3$  дБ, и получено хорошее согласие теории с экспериментом. Изучены возможности фазово-чувствительного усиления оптических сигналов в нелинейных кристаллах и показано, что для достижения максимальной видности необходимо подсвечивать (подавать затравочное излучение) как можно большее число скоррелированных мод усилителя.

**Пятая глава** посвящена теоретическому описанию взаимодействия двухмодового квантового поля с одиночной двухуровневой квантовой системой (кубитом). Показано, что в случае большой частотной отстройки полевых мод от резонансного перехода кубита возникает возможность передачи фотонной статистики от одной полевой моды к другой. Кроме того, показана возможность генерации в такой системе двухмодовых перепутанных состояний и улучшения точности фазовых измерений при взаимодействии поля с кубитом, что может быть использовано для практических приложений в области квантовой обработки информации и сенсорики.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Оценивая работу в целом, следует отметить следующее. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. Среди последних хочется выделить предложенный метод восстановления эффективных весов мод Шмидта из экспериментально измеренных ковариаций для вырожденного режима параметрического рассеяния в двухкристальном интерферометре, который продемонстрировал хорошее согласие теории и эксперимента. Весьма интересными и практически полезными представляются также предложенные методы измерения дисперсии среды в ТГц диапазоне и методы достижения максимальной видности сигнала в процессе многомодового фазово-чувствительного усиления.

В то же время по диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В разделе 2.1.3 приводятся формулы для кросс-ковариаций числа фотонов (сигнального и холостого полей) и авто-ковариаций числа фотонов (сигнального или холостого поля). Однако в обоих случаях формулы содержат параметры и сигнального и холостого полей. Требуются дополнительные пояснения (особенно для вырожденного по частоте режима) или ссылка на работу, где эти пояснения сделаны.

2. На стр. 53 написано: «Построим теоретический подход к описанию эволюции системы при наличии диафрагмы. Оказалось, что связь операторов до диафрагмы и после записывается следующим образом». На мой взгляд, при описании теоретического подхода в этом месте требуется либо ссылка на первоисточник, либо обоснование приведенных формул.

3. При анализе рисунков 4.8 на стр. 93 написано: «Хорошо видно сходство теории и эксперимента по пространственной структуре и по абсолютным значениям. Различия могут быть связаны с неточным сходством формы кристалла при проходе туда и обратно, а также отклонением направления распространения света от центральной оси.» Далее приводятся расчеты, учитывающие эти факторы, однако соответствующего рисунка, демонстрирующего лучшее сходство теории с экспериментом, не приведено.

4. Есть ряд неточностей и опечаток в тексте. Например:

4.1. В некоторых формулах, в частности (1.2), (1.3), нет расшифровки обозначений.

4.2. В формуле (1.41) вместо константы связи  $\Gamma$  должна быть  $g$ .

4.3. В подписи к рисунку 2.9а указано  $\psi_s - \psi_i = \pi$ , а должно быть  $\psi_s - \psi_i = 0$ .

4.4. Формулы Сельмейера (3.17) приводятся без ссылки на источник.

4.5. В начале раздела 5.2.3 (стр. 116) написано: «Начнем с анализа факта, отмеченного в предыдущей подсекции, что при передаче когерентного состояния чистота всегда равна 1 (рис. 5.9а — фиолетовая кривая)». Однако такого факта нет, есть лишь близость чистоты к 1, зависящая от времени.

Тем не менее, эти замечания не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку данной работы. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Научные положения, сформулированные в диссертационной работе, вполне обоснованы. Достоверность и новизна полученных результатов не вызывает сомнений. По теме диссертации опубликовано 9 статей в международных научных журналах, в том числе с высоким рейтингом, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных научных конференциях.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

На основании вышесказанного 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 «Положения 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, доцент, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)

Калачев Алексей Алексеевич

« 6 » декабря 2024 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (843) 231-90-00

E-mail: a.kalachev@knc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.05 — «Оптика»

Адрес места работы:

420111, г. Казань, Лобачевского, д. 2/31

Телефон: +7 (843) 231-90-00; e-mail: presidium@knc.ru