

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Кулика Сергея Павловича
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

Диссертация Р.В. Захарова посвящена теоретическому исследованию неклассических сжатых состояний света, включая многомодовые режимы их генерации, разработке методов управления пространственно-частотными и корреляционными свойствами таких состояний, а также вопросов усиления без добавления шума. Фактически, речь идет об исследовании пространственных и частотных свойств неклассических «сжатых» состояний света при вынужденном параметрическом рассеянии света. Такие состояния характеризуются сильным перепутыванием и корреляциями большого числа фотонов друг с другом и представляют интерес для ряда протоколов квантовой информации. Например, актуальной является задача контролируемой связи между модами яркого сжатого вакуума через взаимодействие с твердотельными кубитами – именно так она сформулирована и решена в диссертационной работе. В работе решается шесть взаимно связанных экспериментальных и теоретических задач:

- разработать методы управления модовым составом, а также корреляциями фотонов сжатого света, генерируемого в вырожденном режиме параметрического рассеяния в интерферометре из двух нелинейных кристаллов;
- исследовать особенности неклассических состояний, генерируемых в сильно невырожденном по частоте режиме параметрического рассеяния, когда один канал соответствует терагерцовому диапазону, а другой – оптическому, а также разработать методы высокоточных квантовых измерений на основе корреляций оптических и терагерцовых фотонов;
- разработать методы реконструкции профилей и весов мод Шмидта из экспериментально измеримых величин для света, генерируемого в процессе параметрического рассеяния света;
- исследовать свойства многомодового сжатия;
- разработать схемы фазово-чувствительного усиления сигнала в нелинейных кристаллах;
- проанализировать возможности передачи состояния между модами квантового поля при их взаимодействии с кубитом.

Таким образом, тема диссертационной работы Захарова Р.В. крайне актуальна, а проведенные теоретические исследования, несомненно, обладают теоретической и практической значимостью.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 149 страниц с 72 рисунками. Список цитируемой литературы содержит 178 наименований.

Первая глава содержит подробный обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

Во второй главе исследуются пространственные свойства и корреляции фотонов сжатых состояний, генерируемых в вырожденном режиме

параметрического рассеяния. Теоретический анализ проводится в рамках формализма мод Шмидта, что позволяет автору описать такие состояния за рамками пертурбативных приближений. Рассматривается схема из двух нелинейных кристаллов, разделённых прослойкой линейной среды, которая формирует своего рода нелинейный интерферометр. Для такой схемы рассчитаны профили и веса мод Шмидта и продемонстрировано изменение модового состава света при варьировании параметров нелинейного интерферометра и интенсивности накачки. Полученные результаты фактически демонстрируют возможность управления модовым составом и корреляциями фотонов неклассического сжатого света. Также в данной главе обсуждаются методы подавления нулевого азимутального канала, существенно ограничивающего степень корреляций фотонов.

Третья глава посвящена анализу свойств скоррелированных оптико-терагерцовых фотонов, генерируемых в сильно невырожденном режиме параметрического рассеяния. Рассмотрен интерферометр, состоящий из двух нелинейных кристаллов, разделенных линейной средой. Разработан теоретический подход, позволяющий описать за рамками теории возмущений корреляции фотонов и модовый состав генерируемого сжатого света в этом случае. В схеме с нелинейным интерферометром на основе корреляций оптических и терагерцовых фотонов предложен метод измерения дисперсионных характеристик сред в терагерцовом диапазоне частот.

В четвертой главе диссертации исследуется фазово-чувствительное усиление большого набора мод неклассического сжатого света. В формализме мод Шмидта разработан теоретический подход, позволивший выявить условия для реализации режимов фазово-чувствительного и фазово-нечувствительного усиления. Разработаны методы восстановления профилей мод Шмидта и их весов из измеренных ковариаций, которые были реализованы экспериментально. Причем результаты эксперимента полностью согласуются с теоретическими предсказаниями. Получено пространственное распределение многомодового сжатия получаемого света, которое демонстрирует хорошее согласие с результатами эксперимента.

Пятая глава посвящена изучению взаимодействия сверхпроводящих джозефсоновских кубитов с двумодовым квантовым полем. В сильно нерезонансном режиме продемонстрирован обмен энергией между полевыми модами и возможность передачи фотонной статистики от одной моды к другой за счет их связи через взаимодействие с кубитом. Обнаружена генерация перепутанных NOON состояний в процессе эффективной связи мод друг с другом. В случае когерентного состояния на входе, продемонстрировано, что кубит может служить светоделителем с перестраиваемой пропускной способностью – так как это делается в подходе «эффективных светоделителей» в квантовой оптике.

Диссертационная работа Захарова Р.В. выполнена на высоком научном уровне.

Мне особенно понравилось, что концепция, развиваемая в работе, опирается на подход, сформулированный Д.Н.Клышко, и относящийся к описанию состояний полей, рождающихся в процессе спонтанного параметрического рас-

сеяния света. В этом подходе рассматриваются три группы факторов, за счет которых можно управлять такими состояниями:

- за счет пространственно-частотного спектра накачки;
- за счет формы рассеивающего объема (конфигурации нелинейных кристаллов);
- за счет пропагаторов сигнальных и холостых полей.

Основное внимание в работе уделяется второму фактору – за счет различных интерференционных эффектов, связанных с учетом относительных фаз состояний сигнальных/холостых мод и взаимного расположения нелинейных кристаллов.

В диссертационной работе Р.В.Захарова получены важные и приоритетные результаты, которые уже апробированы в экспериментах группы М.В.Чеховой.

Одним из наиболее ярких результатов диссертационной работы, на мой взгляд, является разработка методов управления пространственными и корреляционными свойствами яркого сжатого вакуума – прежде всего, за счет интерференционных эффектов. Этот результат может найти применения в квантовой метрологии.

В качестве основных достоинств работы можно выделить следующие:

- Теоретическое предсказание новых физических эффектов, имеющих высокую фундаментальную и прикладную значимость;
- Получение аналитических решений для большинства поставленных задач, что позволяет выявить физические механизмы возникающих физических эффектов
- Использование реалистичных (экспериментальных) данных в проведении теоретических расчётов и оценок.

Также хочется обратить внимание на прекрасный обзор в Успехах физических наук по сжатым состояниям (Р.В.Захаров, О.В.Тихонова, Корреляции фотонов и свойства неклассических оптических полей в состояниях сжатого вакуума. УФН т.193, № 04, с.406-436 (2023)), одним из авторов которого является Р.В.Захаров.

Полученные в работе результаты апробированы публикациями в 9 статьях в рецензируемых международных научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на множестве приоритетных международных научных конференций.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

1. По Главе 2. На стр.40 в разделе 2.1.2 говорится, что «в системе имеется три свободных параметра: расстояние между кристаллами d , фаза между накачкой и излучением на выходе 2-го кристалла и параметрическое усиление G ». Вместе с тем, упомянутая фаза, на мой взгляд, целиком определяется дисперсионными свойствами кристаллов, среды, заполняющей зазор между ними, а также расстоянием d . Поэтому, мне представляется,

что независимых свободных параметров оказывается два, а не три.

Там же: на графиках 2.4а, 2.5b, не следует соединять точки – они соответствуют разным *целочисленным* номерам мод. (Ср. с главой 3: на похожих графиках (3.4а, b) точки не соединены).

2. По Главе 3. В комментарии по Рис. 3.13 говорится: «Экспериментальные результаты приведены на Рис.3.13. Видно хорошее совпадение с теорией во всех случаях». При этом, теоретические результаты приведены на другом рисунке (3.12), что (а) затрудняет сравнение и (б) даже при детальном сравнении я бы не сделал этот вывод...
3. По Главе 5. Не вполне корректно определено понятие кубита. Какие двухуровневые системы имеются ввиду – сверхпроводящие цепи, атомные, ионные или другие – об этом в работе почти не говорится; рассмотрено лишь общее взаимодействие (Гамильтониан (5.1)) без привязки к конкретным физическим системам.
4. К терминологическим неточностям следует отнести различные жаргонизмы, связанные с понятием кубита. Кубит — это, прежде всего, мера квантовой информации (по аналогии с классическим битом – в классической теории). А реализуется кубит на состояниях двухуровневой системы. Очевидно, в работе под термином «твердотельный кубит» имеется ввиду именно двухуровневая система, реализуемая на электронных уровнях атомных/ионных систем и выражения типа «частота кубита», «основное (возбужденное) состояние кубита», «взаимодействие кубита с электромагнитным полем» и т.д. относятся именно к такой ее реализации. Также не вполне корректным является утверждение «...кудиты – фактически, это кубиты, но более высокой размерности» (п.1.3.1, стр.28). Сюда же, наверное, следует отнести, на мой взгляд, не слишком удачное использование термина «неклассический» в названии диссертации: вряд ли сжатые состояния бывают классическими, поэтому если бы название было на одно слово короче, оно бы не потеряло смысла... Термин «локальный осциллятор» — это калька с английского: в русскоязычной литературе используется «опорный генератор». Аналогично, термин «параметрический осциллятор» может быть заменен на «параметрический генератор».
5. И, наконец, в тексте изобилуют опечатки и орфографические ошибки.

Данные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не являются критическими по отношению к проведённым исследованиям. В своей работе Р.В. Захаров получил большое количество важных и принципиально новых результатов, обнаружил новые физические эффекты. 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. «Опти-

ка» (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,
научный руководитель центра квантовых технологий
физического факультета Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Кулик Сергей Павлович

« 2 » декабря 2024 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-31-60

E-mail: sergei.kulik@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 Кулика Сергея Павловича ЗАВЕРЯЮ:

Учёный секретарь ученого совета

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н., доцент

С.Ю. Стремоухов