

1
ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Татьяны Юрьевны Голубевой «Генерация, передача и хранение широкополосного яркого излучения в квантовой оптике и квантовой информатике», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Диссертационная работа Т.Ю.Голубевой посвящена теоретическому изучению ярких широкополосных или многомодовых в пространстве/времени световых полей, находящихся в сжатом и перепутанном состоянии, а также анализу их применимости в информационных протоколах. При этом акцент делается на трех этапах эволюции состояний: генерации, преобразовании и хранении в квантовой памяти. Работа посвящена очень важным аспектам современной квантовой теории обработки информации (Quantum Information Processing) и ее актуальность трудно переоценить. Особенно я бы выделил седьмую главу, которая содержит ряд ключевых результатов, стимулирующих экспериментальные исследования в области широкополосной квантовой памяти.

Актуальность работы несомненна и потому, что в ней упор делается на реалистичные модели известных квантово-информационных протоколов и эффектов (квантовая телепортация, плотное кодирование, квантовая память) - основанных на учете многомодовости и широкополосности используемых (квантовых) полей. Это очень важная особенность данной работы, которая подчеркивает ее значимость. Не секрет, что в последнее десятилетие ввиду большой практической важности квантовой информатики выросло число работ, в которых рассматриваются различные аспекты этой науки в абстрактных терминах/понятиях и слабо связанных с потребностями эксперимента. Данная работа представляет приятное исключение.

Структурно работа состоит из семи глав, Приложения, Введения и Заключения.

В первой главе приведен подробный анализ квантово-статистических поляризационных свойств излучения викселов с учетом шумов всей системы (а не только излучающей моды). Здесь получен ряд важных результатов:

- построена полностью квантовая модель виксела с учетом двулучепреломления и дихроизма;
- предсказан эффект поляризационного сжатия в викселе и проанализирована его природа;
- выполнен анализ динамических и квантово-статистических свойств излучения виксела для двух экспериментально значимых конфигураций;
- сделан вывод о неадекватности феноменологической модели описания шумов излучения и проанализированы причины расхождения спектральных мощностей,

рассчитанных при помощи феноменологической и последовательной квантово-статистической моделей.

Вторая глава посвящена модели невырожденного трехмодового параметрического генератора света. Наиболее существенные результаты этой главы сводятся к следующим:

- найдена трехмодовая функция распределения квази-вероятности числа фотонов и проанализированы ее квантово-статистические особенности при разных уровнях мощности накачки;

- построена ковариационная матрица (размерности 6×6) полной системы трех волн, а также для подсистем. В этой связи проведен анализ чистоты излучаемого поля, а также спектральной степени чистоты для выделенной пары осцилляторов с частотами $\omega_0 \pm \omega$. Показано, что степень чистоты рассматриваемых подсистем существенно зависит от значения параметра синхронизации; в то же время при двухмодовом наблюдении спектральная степень чистоты всегда оказывается выше, чем для полной системы, что связано с наличием квантовых корреляций между подсистемами.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с источниками широкополосного сжатого света, реализованными на вырожденном параметрическом генераторе (ВПГС) и субпуассоновском лазере с синхронизацией фазы. Показано, что:

- для случая ВПГС в силу того, что фаза внешнего классического поля накачки однозначно связана с фазой сигнальной волны, не требуется специального механизма синхронизации;

- излучение ВПГС оказывается сжатым по фазе: величина сжатия возрастает при приближении к порогу во всем диапазоне реалистичных значений параметров. При этом степень сжатия ограничивается только техническими факторами.

- субпуассоновский лазер, синхронизованный слабым когерентным полем является неклассическим источником света, однако проявляет не субпуассоновскую статистику, а амплитудное сжатие;

- выявлены требования к внешнему синхронизирующему полю. Оно должно быть достаточно слабым, чтобы не навязывать статистику излучения лазера и в то же время обеспечивать устойчивый захват фазы. Эти условия совместимы.

В четвертой Главе обсуждается пространственно многомодовый источник неклассического света - т.н. пиксельный источник, состоящий из регулярно расположенных в пространстве субпуассоновских лазеров и/или ПГС. Рассматривается альтернатива гомодинному детектированию на при мере нескольких схем, содержащих в качестве источников сжатые или перепутанные состояния света. Основной результат, полученный в этой главе сводится к тому, что построена модель пиксельного

источника, который генерирует сжатый свет, особенностью которого является сжатие по пространственным переменным. Показано, что пространственный спектр таких источников содержит семейство делокализованных провалов, которые по величине ниже дробового уровня.

Пятая глава посвящена теории квантовых изображений и, в частности, обобщению протокола плотного кодирования оптических изображений для непрерывных переменных на случай пространственно многомодовых полей. Ключевые результаты этой главы отражены на рисунках 5.5, где показаны зависимости плотности взаимной информации для полей с разной статистикой от плотности элементов изображения. Особенно я бы выделил результаты, связанные с учетом коррекции фазы и компенсации дифракционных эффектов. Важным результатом является то, что для квантового канала существует некоторое оптимальное значение плотности элементов изображения, которое соответствует спектру (пространственному) сжатия и/или перепутывания на входе канала.

В шестой главе обсуждаются временные свойства сжатого излучения одномодовых субпуассоновских лазеров с захватом фазы и надпороговых вырожденных параметрических генераторов для протоколов квантового плотного кодирования и квантовой телепортации широкополосного сигнала. Важно, что в этой части теоретически оценено отношение сигнал/шум, получена величина взаимной информации Шенона в зависимости от ширины спектра сигнала передающей стороны (Алисы). Продуктивным оказалась попытка получения верности переноса квантового состояния при помощи впервые введенного понятия спектральной верности.

Седьмая глава посвящена чрезвычайно актуальному направлению современной квантовой информатики - квантовой памяти. Конкретно, речь идет о вариантах квантовой голографической памяти на основе атомных ансамблей в Λ -конфигурации, длинных и коротких импульсов. Я считаю эту главу центральной главой диссертационной работы Т.Ю.Голубевой, в которой в полной мере проявились и высокий уровень "теоретической культуры" и глубокое знание современной ситуации в этой области. Даже простой перечень названий параграфов этой главы дает представление о глубине проведенных исследований. Речь идет о полностью квантовых моделях взаимодействия излучения с веществом при учете статистики поля, потерях, геометрии и частотных расстроек. Найдены пороговые условия, при которых работают упрощенные модели, в частности для случая сведения к двухуровневой рамановской модели. Показано, что спектральная ширина широкополосной памяти примерно на четыре порядка превышает соответствующую величину для адиабатической памяти - результат, достойный экспериментальной проверки. Интересным на мой взгляд

результатом является привлечение аппарата мод Шмидта к задаче об эффективности квантовой памяти.

В Приложение вынесены вспомогательные материалы по статистике изолированных импульсов.

К работе имеется несколько замечаний.

К Главе 3:

1. не вполне понятен физический смысл термина "регулярная накачка" - именно такая накачка обеспечивает субпуассоновскую статистику излучения лазера (стр 97).

2. На мой взгляд, не очень удачно описывается эффект проявления амплитудного сжатия при слабой синхронизации субпуассоновского лазера внешним когерентным полем: "Субпуассоновский лазер...обнаруживает не субпуассоновскую статистику" (стр. 107)!

3. Глава называется "Источники широкополосного жатого света", однако количественно, фактор "широкополосности" на нашел отражения в тексте - спектральная зависимость иллюстрируется одним рисунком 3.3, на котором изображены неопределенности квадратур в режиме захвата фазы от частоты.

По главе 4:

4. В русскоязычной литературе, как правило, используется термин "опорный генератор", а не калька с английского "локальный осциллятор (local oscillator)" (стр. 109 и далее) .

5. К параграфу 4.3, на мой взгляд, требуется рисунок, поясняющий конфигурацию пиксельных источников/резонаторов.

К Главе 5:

6. Наверное, в перечне ссылок на теорию квантовых оптических изображений, надо было упомянуть работы Д.Н.Клышко (А.В.Белинский, Д.Н.Клышко, *Двухфотонная оптика: дифракция, голография, преобразование двумерных сигналов*. ЖЭТФ, 105, 487 (1994)) и экспериментальной группы Я.Х.Ши ("*Optical Imaging by Means of Two-Photon Entanglement*," Т.В. Pittman, D.V. Strekalov, A.V. Sergienko and Y.H. Shih, Phys. Rev. A, Rapid Comm., Vol. 52, R3429 (1995).)

7. По-моему, название параграфа 5.1.3. (Свойства пространственно-многомодового сжатого света) не вполне соответствует содержанию - здесь было бы логично перечислить эти свойства или по крайней мере выделить - по факту они оказались скрыты в тексте.

Кроме того, в работе имеется ряд досадных опечаток в обозначении формул и рисунков, в частности на стр.110, 113, 147, и др.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что работа Т.Ю.Голубевой отличается высоким уровнем профессионализма, удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а сама Т.Ю.Голубева, безусловно, заслуживает присвоения искомой ученой степени.

Доктор физико-математических наук,
профессор

 С.П.Кулик

Подпись С.П.Кулика удостоверяю
Декан физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова,
профессор





Н.Н.Сысоев

