



УТВЕРЖДАЮ”

Секретарь Санкт-Петербургского

государственного университета

И.А. Скворцов

11 мая 2011 г.

В диссертационный Совет Д 501.001.31 при  
Московском государственном университете им.  
М.В. Ломоносова

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе Сайгина Михаила Юрьевича  
**Многомодовые перепутанные состояния в связанных оптических  
параметрических взаимодействиях и их применения в телепортации**

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

В последние десятилетия в оптике активно изучаются физические свойства, способы генерации и применения неклассических световых полей в сжатых, перепутанных и т.д. состояниях. По мере накопления сведений о таких полях и о возможностях, которые открываются для высокочувствительных измерений и для новых методов обработки информации, стал актуальным вопрос о широком использовании оптического параллелизма, т.е. об использовании в данном круге явлений многомодовых, в том числе пространственно многомодовых световых полей - носителей оптических изображений в существенно неклассическом состоянии.

В представленной диссертации автор теоретически исследует возможности получать и преобразовывать многомодовые поля в параметрических кристаллах с целенаправленно созданной продольной доменной структурой, в которых имеются условия для одновременно протекающих связанных параметрических процессов взаимодействия многих волн. Работа нацелена на объединение подходов физики квантовых изображений и методов нелинейной оптики, повышающих эффективность параметрических взаимодействий. Таким образом, предмет исследования является современным и актуальным.

Обзор литературы, данный во вводной главе 1, хорошо составлен и написан и охватывает основные современные результаты, необходимые автору для собственного исследования. Так как исследование находится на стыке нескольких направлений (параметрическая оптика, квантовые изображения и квантовая информация) можно отметить большой объем проделанного разбора литературы.

В главе 2 автор предлагает схемы и исследует квантовую статистику полей для двух конкретных конфигураций связанных параметрических взаимодействий попутных световых волн.

Всего комбинируют пять волн различных, но взаимно согласованных частот. Автор принимает, что попутный синхронизм для всех взаимодействий может быть обеспечен подбором регулярной или случайной продольной доменной структуры кристалла. Истощение двух классических волн накачки считается пренебрежимым, огибающие квантованных полей полагаются медленными (применяется усреднение по их быстрой модуляции на деталях доменной структуры).

В первой схеме одновременно идут два связанных процесса спонтанного параметрического рассеяния волн накачек и процесс взаимного рассеяния двух из трех вторичных волн, за каждый процесс отвечает своя постоянная связи. Автор получил в аналитическом виде решения как для гайзенберговских операторов, так и для волновых функций трех полей, и нашел их энтропии фон Неймана. Наиболее интересным результатом здесь является предсказание значительного квантового перепутывания на основе исследования условных энтропий в области их отрицательных значений, т.е. при значениях, невозможных для классических условных энтропий Шеннона. Расчет дисперсий разностей квадратурных амплитуд подтверждает наличие значительного перепутывания в тех же областях физических параметров. Заметим, что здесь было бы полезно дать физическую интерпретацию найденного в расчетах возрастания "полезного" перепутывания при росте линейного смещения волн в одном из каналов взаимодействия.

Другая рассмотренная в главе 2 комбинация процессов включает одно спонтанное параметрическое рассеяние с последующей конверсией каждой из полученных частот вверх с участием той же классической накачки. Физически значимым является вывод о том, что здесь а) можно одновременно получить эффективное перепутывание как в паре волн низких частот, так и в паре волн с частотами, преобразованными вверх, и б) имеется дополнительный квантовый ресурс, связанный с также эффективным квадратурным перепутыванием между волнами, относящимися к низкочастотной и высокочастотной парам.

Глава 3 посвящена теории квантовой телепортации перепутанного состояния двух мод светового поля, которое рождается в обычном режиме параметрического рассеяния. В качестве ресурса для квантового канала используются две пары волн, приготовленных в связанных параметрических процессах второго типа из рассмотренных в главе 2. Фактически схема скомпонована как две параллельных схемы телепортации непрерывных переменных, но в расчетах квантовых статистических характеристик учитывается полный набор параметров корреляции всех задействованных полей. Автор обобщил теоретические построения, которые приводят к удобным соотношениям для верности  $F$  воспроизведения входного квантового состояния (применяемый в диссертации термин точность кажется нам не вполне удачным, т.к. он широко используется в физике в отличающемся смысле), и показал, что предложенный алгоритм телепортации позволяет достичь значений верности, значительно превосходящих классическое значение.

Области значений параметров связанных параметрических взаимодействий и входного перепутанного состояния, в которых имеется эффективная телепортация, определены автором в двух взаимно дополняющих подходах: с использованием параметра верности и на основе вычисления дисперсий сумм и разностей квадратурных амплитуд. Положение этих областей, показанное на рисунках 3.5 и 3.7, находится в хорошем качественном согласии.

В главе 4 квантовое описание связанных параметрических взаимодействий нескольких волн, построенное в главе 2, применяется к задаче о параметрическом усилении входного монохроматического изображения, которое подается на кристалл на одной из

комбинирующих частот. Все поля, кроме волн накачки, теперь считаются широкополосными (многомодовыми) как во временном измерении, так и в поперечном сечении всех волновых фронтов и могут рассматриваться как носители зависящих от времени оптических изображений. Теория остается линейной (точнее, линеаризованной), и строится в рамках принятых в данном круге задач допущений: параксиальное приближение, относительная узость спектров временных частот, что позволяет разумным образом упростить анализ временного и пространственного синхронизма.

Количественно рассмотрен одновременный перенос входного изображения на все 4 комбинирующие частоты с одновременным усилением. Исследованы конфигурации, в которых параметрический кристалл помещается в ближней или дальней зоне, когда на кристалл поступает непосредственно входное изображение или его образ Фурье. Автор изучил энергетическое отношение сигнала к шуму во всех каналах и выявил корреляции чисел фотонов в модах неклассического характера. Результаты главы 4 можно рассматривать как обобщение привлекавших ранее большое внимание схем параметрического переноса изображений из инфракрасного диапазона в видимый на случай большего числа частот.

Существенное обобщение теории телепортации перепутанных состояний пары волн, развитой в главе 3, на квантовую голографическую телепортацию перепутанных оптических изображений дано в главе 5 работы. Как и в главе 4, поля сигнала и поля квантового канала считаются широкополосными (многомодовыми) как во временном измерении, так и в поперечном сечении всех волновых фронтов. Входные перепутанные изображения приготавливаются посредством параметрического усиления исходного изображения в когерентном состоянии. При этом возникает дополнительный по сравнению с известным случаем телепортации изображений в когерентном состоянии физический параметр, связанный с поперечной длиной корреляций в перепутанных изображениях. Автор детально исследует верность телепортации и дает рекомендации по оптимальному согласованию поперечных масштабов полей сигнала, квантового канала и пикселей наблюдения.

Новизна результатов, полученных в главе 5, состоит в том, что схема голографической телепортации изображений обобщена на случай перепутанных входных полей, что представляет очевидный интерес для параллельных протоколов квантовой информации.

В качестве **замечаний** отметим следующее.

Приведенные в главе 3, посвященной телепортации, на рис. 3.5 значения верности ниже классического предела, которые реализуются даже при значительном перепутывании в квантовом канале, следует, по нашему мнению, связывать не с тепловым характером статистики сигнального и холостого полей, а с тем, что более жесткая корреляция квадратур этих полей быстрее нарушается добавляемым шумом.

Укажем на погрешность изложения в главе 4. Так как преобразование фильтрации квантованного поля вида (4.23) аналогично преобразованию смешения полей на спектрально зависимом делителе, то в общей записи в выходном поле должны присутствовать дополнительные вакуумные вклады, сохраняющие коммутационные соотношения. Они не проявляют себя только при расчете нормально упорядоченных выражений для наблюдаемых, что, по-видимому, имеется в виду в данном месте работы, но не оговорено явно.

В главе 5 при анализе верности телепортации перепутанных изображений пиксели, относящиеся к каждому из перепутанных близнецов, вообще говоря, могут выбираться независимо, и было бы уместно обсудить поведение корреляций с учетом этой возможности.

Сделанные замечания не ставят под сомнение результаты, полученные автором, и не влияют на высокую оценку работы. Диссертация М.Ю.Сайгина является законченным теоретическим исследованием в современной и актуальной области оптики. Проведенные в

работе расчеты основаны на современном теоретическом аппарате. Достоверность результатов обоснована качественными оценками и предельными переходами к известным закономерностям, и не вызывает сомнений. Работа выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых и практически значимых выводов.

Основные результаты диссертации докладывались на международных и российских конференциях, опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Автореферат верно отображает содержание диссертации.

Результаты и выводы работы могут быть рекомендованы к использованию в Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Физико-техническом институте РАН им. А.Ф.Иоффе, Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова, Санкт-Петербургском государственном университете и других организациях, занимающихся исследованиями в области оптики и квантовой электроники.


Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационное исследование Сайгина Михаила Юрьевича по своему научному уровню, научной и практической значимости результатов удовлетворяет требованиям ВАК (п.8 "Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней и ученых званий"), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.21 - лазерная физика и 05.27.03 - квантовая электроника, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен заведующим кафедрой Общей физики I Санкт-Петербургского государственного университета профессором, доктором физ.-мат. наук И.Ч.Машеком и профессором, доктором физ.-мат. наук И.В.Соколовым. Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры Общей физики I Санкт-Петербургского государственного университета (протокол № 8 от 26 апреля 2011 г.).

Заведующий кафедрой Общей физики I  
Санкт-Петербургского государственного университета  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Доктор физ.-мат. наук, профессор

26 апреля 2011 г.

 И.Ч.Машек

 И.В.Соколов