

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

На правах рукописи

КРИВИЦКИЙ Леонид Александрович

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ БИФОТОНОВ

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2005

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кулик Сергей Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Вятчанин Сергей Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор Менский Михаил Борисович

Ведущая организация: Физико-технологический институт
РАН.

Защита состоится "24" марта 2005 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ, ул. Акад. Хохлова, д. 1, КНО, аудитория им. С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан "_21_" февраля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физ.-мат. наук, доцент

Т.М. Ильинова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена измерению, условным преобразованиям и особенностям передачи в оптическом волокне поляризационных состояний бифотонов.

Актуальность темы. Среди обширного круга задач современной квантовой оптики особое место занимают задачи, связанные с использованием *перепутанных* состояний фотонов. В соответствии с определением, составная система находится в чистом перепутанном состоянии, если вектор состояния этой системы не факторизуется, т.е. его нельзя представить в виде произведения векторов состояний отдельных подсистем. Процесс спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света является наиболее доступным методом получения перепутанных состояний фотонов. Уникальные свойства коррелированных пар фотонов, рожденных при СПР (*бифотонов*), находят приложения, как в связи с фундаментальными вопросами, как например проверка неравенств Белла и его аналогов, так и в перспективных прикладных задачах, таких как создание элементной базы квантового компьютера, квантовая криптография, квантовая метрология и др. Использование состояний света с заданными свойствами в тех или иных экспериментах предполагает решение трех связанных между собой задач:

1. Генерация таких состояний. Оказывается, что при определенных режимах СПР, с помощью поляризационных состояний бифотонного излучения возможно кодирование

информации, как в виде *кубитов* (квантовых двухуровневых систем), так и *кутригов* (квантовых трехуровневых систем). В связи с этим, представляется крайне интересным развитие способов генерации и преобразования состояний квантовых систем, основанных на бифотонах.

2. Передача по каналу связи. При разработке систем обработки и передачи квантовой информации большое значение предается оптическим волоконным линиям (ОВЛ). Это связано с тем, что фотоны, как носители информации, являются достаточно перспективными объектами. Они обладают высокой скоростью распространения; ОВЛ позволяют осуществлять адресную транспортировку фотонов-носителей к квантовым логическим элементам, преобразующим и хранящим квантовую информацию; к настоящему времени накоплен огромный опыт, и развиты технологии управления классическими информационными процессами на основе ОВЛ.

3. Измерение состояния. Для практической реализации протоколов квантовой информации необходимы надежные измерительные процедуры контроля за состоянием системы в данный момент времени. Поэтому, крайне актуальным представляется разработка и реализация процедуры *томографии* квантовых состояний.

Цель работы. Целью диссертационной работы являлось изучение широкого класса поляризационных состояний бифотонного поля и

преобразований, проводимых над ними. Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка и реализация алгоритмов измерения всех поляризационных параметров, характеризующих произвольное состояние трехуровневой системы на основе бифотонов (кутриты) – как чистое, так и смешанное.

2. Осуществление условных унитарных преобразований поляризации бифотона в поляризационно-перепутанном состоянии.

3. Разработка метода калибровки детекторов единичных фотонов с помощью условных преобразований бифотонов.

4. Разработка способа приготовления белловских состояний бифотонов, основанного на эффекте «расплывания» корреляционной функции второго порядка по интенсивности в оптическом волокне.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях:

1. Предложен и впервые реализован алгоритм томографического восстановления произвольного состояния бифотона-кутриты.

2. Определена квантовая эффективность фотодетектора, работающего в режиме счета фотонов по результатам эксперимента по условным преобразованиям бифотонов.

3. Решена задача о преобразовании белловских состояний в режиме распространения бифотонов в ОВЛ.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в возможном использовании полученных результатов в различных прикладных задачах квантовой оптики:

1. При реализации протокола квантовой криптографии с использованием бифотонов-кутритов.

2. Для абсолютной калибровки фотодетекторов.

3. Для коммуникации с использованием бифотонных состояний, распространяющихся в оптическом волокне.

На защиту выносятся следующие положения:

1. С помощью разработанных протоколов квантовой томографии можно восстановить исчерпывающую информацию о поляризационном состоянии бифотона-кутриты.

2. Смешанное поляризационное состояние кубита, являющегося частью перепутанной пары, можно очистить без потерь при помощи условных преобразований поляризации сигнального фотона бифотонного поля в зависимости от состояния поляризации холостого фотона.

3. При условном преобразовании поляризации фотонов в сигнальной моде бифотонного поля степень поляризации определяется квантовой эффективностью детектора, помещенного в холостую моду.

4. Способ приготовления перепутанных состояний (состояний Белла) на основе эффекта расплывания корреляционной функции второго по интенсивности порядка,

возникающего при распространении бифотонного поля через среду с дисперсией групповой скорости.

Апробация работы. Результаты работы прошли апробацию на следующих международных и всероссийских конференциях:

Конференция молодых специалистов “**Оптика-2001**”, г. Санкт-Петербург, Россия 2001г. **International Conference on Quantum Optics (ICQO’02, 04)** г. Минск, Беларусь. **International Quantum Electronics Conference (IQEC’02)** г. Москва, Россия 2002г. **EURESCO conference 2002 “Quantum optics”**, г. Сан-Фелиу де Гишольс, Испания 2002г. Международная конференция “**Фундаментальные проблемы оптики**”, г. Санкт-Петербург, Россия 2002г. **Quantum Electronics and Laser Science (CLEO/QELS’03)** г. Балтимор, США 2003г. **IX Международные Чтения по квантовой оптике**, г. Санкт-Петербург, Россия 2003г. 6-ая, 7-ая Международная научная молодежная школа «**Когерентная оптика и оптическая спектроскопия**» г. Казань, Россия 2003, 2004г. 49-ое ежегодное собрание общества SPIE «**Optics and Technology**» г. Денвер, США 2004г. Международный симпозиум «**Квантовая информатика**» (**QI’04**), г. Москва, Россия 2004г. Третья Азиатско-тихоокеанская конференция по квантовой информации **APWQIS-3**, Сингапур, 2005г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 127 наименований, изложена на 116 страницах и содержит 18 рисунков и 2 таблицы.

Личный вклад. Все использованные в диссертации результаты получены автором лично.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава посвящена процедуре измерения поляризационного состояния одномодовых бифотонов – поляризационной томографии. Ранее было показано, что поляризационное состояние бифотонов в одномодовом пространственно-частотном режиме может быть представлено в виде квантовой трехуровневой системы или *кутрита*:

$$|\Psi\rangle = c_1 |2, 0\rangle + c_2 |1, 1\rangle + c_3 |0, 2\rangle, \quad (1)$$

где $|m, n\rangle$ - фокковский вектор с заданным числом фотонов m и n в ортогональных поляризационных модах, причем $m + n = 2$, а c_i ($i = 1, 2, 3$) - комплексные амплитуды состояния. В настоящей работе предложено два протокола линейного томографического восстановления неизвестного поляризационного состояния кутрита.

Первый протокол основан на измерении проекций исследуемого состояния в различных поляризационных базисах, по средством проведения линейных поляризационных преобразований в плечах интерферометра интенсивностей Брауна-Твисса после пространственного разделения бифотона. Схема эксперимента

изображена на рис.1. Идея состоит в том, что поляризация входного излучения преобразуется заданным образом при помощи фазовых пластин (полу- и четвертьволновых) и поляризаторов, помещенных в каждое из плеч интерферометра. Тем самым регистрируемый момент четвертого порядка по полю выражается через все параметры, задающие неизвестное состояние кутрита, и будет определяться параметрами преобразователей поляризации в каналах. В эксперименте для приготовления исходных состояний кутритов используется SU_2 – преобразование, выполняемое при помощи фазовой пластинки. К полученным экспериментальным результатам применяются статистические алгоритмы восстановления состояния, что позволяет избавиться от влияния статистических и аппаратных ошибок, возникающих в

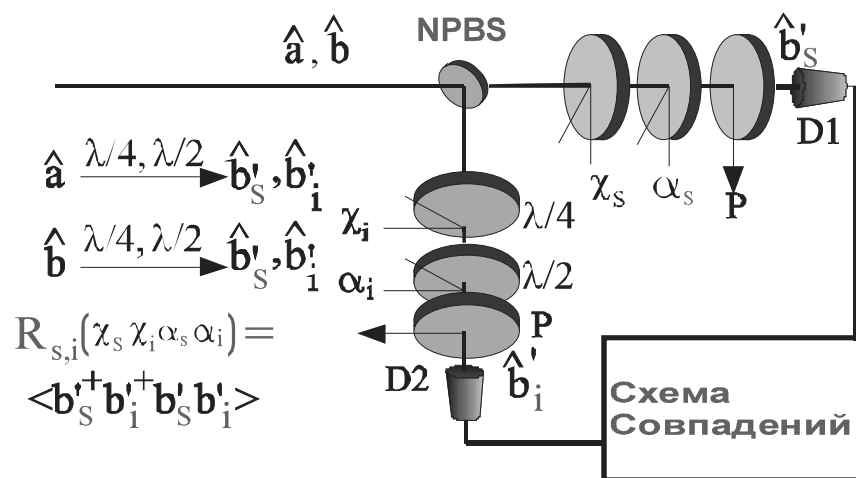


Рис.1

Схема эксперимента, в которой скорость счета двухфотонных совпадений $R_{s,i}$ определяется параметрами произвольного кутрита через ориентации фазовых пластин (полу- и четвертьволновых) и поляризаторов, установленных в плечах измерительной системы.

эксперименте. При этом значения параметра соответствия между теоретическим и экспериментально восстановленным вектором состояния (fidelity) составляет 99,8%.

Во втором протоколе томографии кутритов преобразования осуществляются фазовыми пластинками над бифотонами, как над цельными объектами. После этого, они направляются в модифицированную схему интерферометра Брауна-Твисса, где и происходит их пространственное разделение и регистрация (рис.2) четырьмя детекторами. Из расчета соответствующих поляризационных преобразований в указанной схеме, удалось найти оптимальные параметры преобразователей, при которых компоненты матрицы плотности кутрита выражаются через измеряемые в эксперименте моменты четвертого порядка по полю наиболее простым образом.

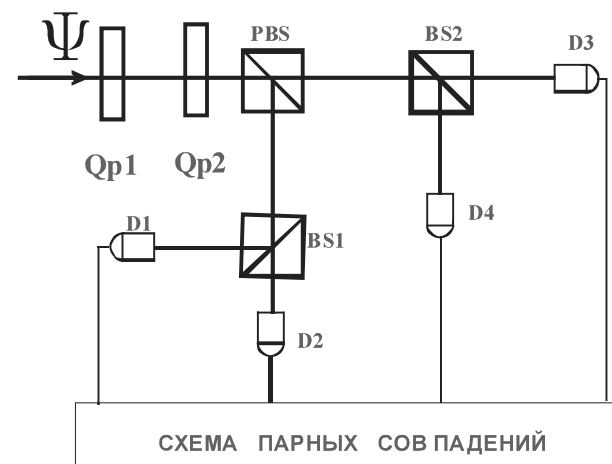


Рис.2

Реализация протокола томографии кутритов в котором бифотоны преобразуются как цельные объекты. Входное состояние преобразуется двумя фазовыми пластинками Qp1 и Qp2, а затем поступает в поляризационный интерферометр Брауна-Твисса

Во второй главе продемонстрировано условное унитарное преобразование поляризации одного из фотонов перепутанной пары (поворот на 90^0) по сигналу регистрации сопряженного фотона.

Замечательным свойством эффекта СПР является то, что регистрация фотона в сигнальном плече гарантирует наличие сопряженного фотона в холостом плече. В предложенном эксперименте бифотоны генерируются при СПР типа II в вырожденном по частоте, неколлинеарном режиме в состоянии $|\psi\rangle = |H_1, V_2\rangle + e^{i\alpha} |V_1, H_2\rangle$ (здесь индексы 1 и 2 обозначают пространственные моды, а индексы H, V - поляризации фотонов). При этом единичные фотоны в каждой пространственной моде (например, в моде 2) находятся в неполяризованном смешанном состоянии вида:

$$\rho_2 = 1/2(|H_2\rangle\langle H_2| + |V_2\rangle\langle V_2|) \quad (2)$$

Фотодетектор регистрирует фотоны в холостой пространственной моде после поляризационной селекции (вертикальной) и его сигнал используется как триггер. При регистрации холостого фотона, на электрооптическую ячейку Поккельса, установленную в сигнальном плече, подается импульс полуволнового напряжения. Во время рабочего участка импульса высокого напряжения ячейка Поккельса поворачивает поляризацию проходящего сигнального фотона на 90^0 . Если бы триггерный детектор был идеальным (квантовая эффективность равна 100%),

то детектор в сигнальном плече должен был бы регистрировать фотоны заданной поляризации (только вертикальной). В этом случае, исходное неполяризованное состояние сигнальных фотонов (2) преобразуется в чистое состояние с заданной поляризацией. $|\varphi\rangle = |V_2\rangle$, т.е. происходит «очищение» смешанного состояния.

Если триггерный детектор имеет конечную квантовую эффективность, равную η , то состояние (2) «очищается» частично и в этом случае его матрица плотности запишется в виде суперпозиции трех слагаемых:

$$\rho_2 = 1/2(\eta|V_2\rangle\langle V_2| + (1-\eta)|H_2\rangle\langle H_2| + |V_2\rangle\langle V_2|). \quad (3)$$

Нетрудно показать, что для состояния (3) среднее значение степени поляризации равно квантовой эффективности триггерного детектора η . Зависимость интенсивности от ориентации линейного поляризатора θ в этом случае имеет вид

$$I(\theta) = 1/2(1 - \eta \cos 2\theta). \quad (4)$$

В результате, по измерению поляризационной модуляции интенсивности (4) в сигнальном канале, равно как и по измерению степени поляризации, можно определить квантовую эффективность триггерного детектора. В соответствии с (3), результирующее состояние сигнального фотона зависит от квантовой эффективности триггерного детектора. Это условие хотя и ограничивает предел «очищения» изначально смешанного состояния, но одновременно предоставляет способ абсолютного (безэталонного) измерения квантовой эффективности триггерного

детектора. Измеренное значение квантовой эффективности предложенным способом составило $\eta = 44.8 \pm 4.5\%$, что в пределах погрешности совпадает со значением, полученным традиционным методом квантовой фотометрии с использованием бифотонов, равного $\eta_{\text{трад}} = 47.6 \pm 0.2\%$.

В Третьей главе рассматривается эффект «расплывания» корреляционной функции (КФ) второго порядка по интенсивности в среде с дисперсией групповой скорости (ДГС) и демонстрируется, что он может быть использован для решения одной из основных задач квантовой оптики – приготовления состояний Белла.

Состояния Белла – это максимально перепутанные состояния пары фотонов, характеризуемых какими-либо двумя параметрами – например, номером пространственной моды и поляризацией. Наиболее простым способом их приготовления является СПР при неколлинеарном частотно-вырожденном синхронизме типа II. Принципиальным моментом такого способа приготовления является необходимость компенсации групповой задержки, которая возникает между двумя фотонами одной пары за счет двупреломления в нелинейном кристалле. Если групповая задержка не скомпенсирована, то по порядку прихода фотонов на детекторы можно различить, в какой из двух пространственных мод находится фотон заданной поляризации. Такая различимость служит критерием отсутствия двухфотонной интерференции. Вместо компенсации групповой задержки иногда перед детекторами помещают узкополосные фильтры, что частично

снимает неразличимость и приводит к появлению двухфотонной интерференции.

Известно, что при пропускании двухфотонного света через среду с ДГС КФ второго порядка по интенсивности «расплывается», подобно короткому импульсу, и в дальней зоне приобретает форму спектра. В работе показано, что на основе эффекта «расплывания» КФ бифотона в среде с ДГС возможно восстановить двухфотонную интерференцию и приготовить чистые белловские состояния. Идея заключается в том, что высокая видность двухфотонной интерференции получается за счет расплывания в волокне волновых пакетов, соответствующих сигнальному и холостому фотонам. При этом нет необходимости использовать узкополосные фильтры или осуществлять компенсацию групповых задержек, однако необходимо производить селекцию временной корреляционной функции.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен и реализован протокол квантовой томографии поляризационного состояния однопучковых частотно-вырожденных бифотонов (кутритов). Проведены измерения набора моментов четвертого порядка, определяющих матрицу когерентности для различных состояний входного бифотонного поля. По результатам измерений восстановлены компоненты

матрицы когерентности четвертого порядка и все значения комплексных амплитуд входных состояний.

2. Реализованы условные поляризационные преобразования бифотонного состояния, основанные на действии ячейки Погкельса на сигнальный фотон в зависимости от поляризационного измерения над коррелированным холостым фотоном. Преобразования были выполнены, как для смешанного состояния бифотонного поля, так и для чистого поляризационно-перепутанного белловского состояния.

3. Разработан новый метод абсолютной калибровки однофотонных детекторов. Результаты калибровки показали, что точность предложенного метода, сравнима с традиционными методами абсолютной калибровки.

4. Показано, что эффект «расплывания» двухфотонного волнового пакета (бифотона) в среде с дисперсией групповой скорости может быть использован для приготовления двухфотонных состояний Белла. Такой способ приготовления белловских состояний не требует компенсации групповых задержек между фотонами различной поляризации, но предполагает селекцию временной корреляционной функции интенсивности.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. G. Brida, M.V. Chekhova, M. Genovese, M. Gramegna, L.A. Krivitsky, M.L. Rastello, *Single-photon detector calibration by means of conditional polarization rotation//*

Journal of Optical Society of America B, v. **22**, No.2, pp. 488-492 (2005).

2. Л.А. Кривицкий, М.В. Чехова, «*Расплывание» бифотона в среде с дисперсией групповой скорости и двухфотонная интерференция//* Письма в ЖЭТФ, т. **81**, в. 3, сс. 125-128 (2005).
3. Л.А. Кривицкий, С.П. Кулик, Г.А. Масленников, М.В. Чехова, *Поляризационные свойства одномодовых бифотонов//* Квантовая электроника, т. **35**, №1 (391), сс. 69-80 (2005).
4. M.V. Chekhova, L.A. Krivitsky, S.P. Kulik, G.A. Maslennikov, *Orthogonality of Biphoton Polarization States//* Phys. Rev. A, v. **70**, 053801 (2004).
5. Yu. Bogdanov, M. Chekhova, L. Krivitsky, S.P. Kulik, L.C. Kwek, M.K. Tey, C. Oh, A. Penin, A. Zhukov, *Statistical Reconstruction of Qutrits//* Phys. Rev. A, v. **70**, 042303 (2004).
6. G. Brida, M.V. Chekhova, M. Genovese, M. Gramegna, L.A. Krivitsky, S.P. Kulik, *Conditional Unitary Transformations on Biphotons//* Phys. Rev. A v. **70**, 032332 (2004).
7. Ю.И. Богданов, Л.А. Кривицкий, С.П. Кулик, *Статистическое восстановление квантовых состояний оптических трехуровневых систем//* Письма в ЖЭТФ, т. **78**, в. 6, сс. 804-809 (2003).

8. Л.А. Кривицкий, С.П. Кулик, А.Н. Пенин, М.В. Чехова, *Бифотоны как трехуровневые системы: преобразование и измерение*// ЖЭТФ, т. **124**, в. 4(10), сс. 1-13 (2003).
9. А.В. Бурлаков, Л.А. Кривицкий, С.П. Кулик, Г.А. Масленников и М.В. Чехова, *Измерение кутритов*// Оптика и спектроскопия, т. **94**, в. 5, сс. 744-750 (2003).