

На правах рукописи

ЧЕХОВА МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА
БИФОТОННЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2004

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Чиркин Анатолий Степанович

доктор физико-математических наук,
профессор Соколов Иван Вадимович

доктор физико-математических наук,
профессор Поливанов Юрий Николаевич

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н.Лебедева
РАН

Защита состоится «18» марта 2004 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, Москва, ул. акад. Хохлова, д. 1, КНО, аудитория им. С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан «___» _____ 2004 года

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

Т.М.Ильинова

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию поляризационных и спектральных свойств бифотонных полей, приготовлению состояний бифотонного поля с новыми поляризационными и спектральными свойствами, а также некоторым применениям бифотонных полей в спектроскопии.

Бифотонным полем называется световое поле с парной корреляцией фотонов. Под парной корреляцией понимается высокая величина нормированной корреляционной функции интенсивности или, с точки зрения квантового описания, нормированного нормально упорядоченного второго момента числа фотонов. На языке эксперимента можно сказать, что для бифотонного поля должен наблюдаться высокий уровень корреляции (совпадений) фотоотчетов двух детекторов, регистрирующих излучение в соответствующих модах поля. В случае идеальных детекторов, регистрирующих бифотонное поле, одиночных фотоотчетов вообще быть не может, так как фотоны в таком поле присутствуют только парами. Пару коррелированных фотонов часто называют бифотоном. Корреляция фотонов в парах может быть не только по моменту рождения, но также по частоте, волновому вектору и поляризации.

Бифотонное поле – один из очень немногих видов неклассических световых полей, которые на сегодняшний день можно получить экспериментально. Свойства неклассических полей можно объяснить лишь в рамках последовательного квантового подхода. Формально, бифотонное поле, получаемое в эксперименте, представляет собой суперпозицию вакуумного состояния и двухфотонного фоковского состояния. Наиболее эффективный способ получения бифотонного поля – это спонтанное параметрическое рассеяние света (СПР), хотя существуют и другие способы.

К применениям бифотонных полей можно отнести квантовую метрологию, спектроскопию, передачу квантовой информации. Более фундаментальные применения включают проверку неравенств Белла, эксперименты по «квантовой телепортации» и квантовые вычисления.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Можно утверждать, что бифотонные поля занимают центральное место в современной квантовой оптике. При этом основное значение для бифотонных пучков имеют их поляризационные свойства. Прежде всего, поляризация квантовых состояний света описывается в терминах дихотомных переменных, что важно для передачи информации, проверки неравенств Белла и квантовых вычислений. В экспериментах по двухфотонной интерференции, как и интерференции вообще, поляризационные интерферометры более устойчивы и удобны. Наконец, в оптике имеется хорошо

разработанный аппарат поляризационных преобразований. Все это приводит к тому, что большая часть оптических экспериментов с бифотонными полями - это поляризационные эксперименты. *Поэтому большая часть диссертационной работы посвящена исследованию поляризационных свойств коррелированных двухфотонных состояний.*

В последнее десятилетие наметился интерес и к спектральным свойствам коррелированных фотонов. Связано это прежде всего с использованием для их приготовления фемтосекундных импульсных

лазеров, ширина спектра которых сравнима с шириной спектра двухфотонного света, генерируемого от непрерывной накачки. Оказалось, что многие квантовооптические эффекты в таком нестационарном случае происходят по-другому. Кроме того, использование невырожденных по частоте коррелированных фотонов может быть основой для приготовления перепутанных по частоте состояний. Соответственно, *еще одна часть диссертационной работы посвящена исследованию спектральных свойств коррелированных фотонных состояний.* Следует подчеркнуть, что под спектральными свойствами понимается не только спектр самого бифотонного поля, но и влияние спектра накачки на корреляционные функции этого поля.

Известно, что при приближении частоты одного из коррелированных фотонов к собственным частотам среды параметрическое рассеяние переходит в комбинационное рассеяние на поляритонах (а гиперпараметрическое рассеяние - в гиперкомбинационное рассеяние на поляритонах). Несмотря на это, в оптике всегда существовал определенный разрыв между квантовой оптикой, в которой роль среды и ее резонансов практически игнорировалась, и спектроскопией рассеяния на поляритонах, где почти не обсуждалась статистика излучения. Поэтому в диссертацию включен *третий раздел, посвященный пограничной области между квантовой оптикой и спектроскопией рассеяния света на поляритонах.*

Актуальность темы диссертационной работы связана как с фундаментальными задачами, так и с применением бифотонных полей в квантовой информатике, метрологии, спектроскопии. Действительно, хотя получение бифотонных полей с помощью СПР уже давно освоено и не является научной задачей, *интерес представляет получение бифотонных полей с заданными спектральными и поляризационными свойствами.* Так, например, оказывается, что бифотонное поле, относящееся к одной пространственной и частотной моде, но находящееся в произвольном поляризационном состоянии, аналогично трехуровневой системе, и его преобразования задаются группой $SU(3)$. Таким образом, по своей симметрии такие бифотоны аналогичны кваркам. Это обстоятельство, само по себе интересное с фундаментальной точки зрения, позволяет использовать бифотонные поля в

квантовой информатике, где на основе бифотонных полей может быть развита квантовая троичная логика. *Актуальной является также группа задач, связанных с характеристикой бифотонных полей - определение поляризационного состояния бифотонного поля и исследование его корреляционных свойств.* Так, до сих пор не существует методов, позволяющих измерить для бифотонных полей корреляционную функцию второго порядка.

Основная цель работы - исследование поляризационных и спектральных свойств бифотонных полей, а также применение бифотонных полей в спектроскопии. В соответствии с этой целью, были поставлены следующие *задачи диссертационной работы*:

1. Провести сравнительный анализ различных методов исследования бифотонных полей: измерение спектра, измерение корреляционной функции второго порядка, исследование эффекта антикорреляции.
2. Изучить влияние спектра накачки на следующие свойства бифотонных полей:
 - а) корреляционные функции первого и второго порядка;
 - б) двухфотонная интерференция;
 - в) особенности проявления эффекта антикорреляции.
3. Изучить поляризационные состояния бифотонного поля в одной пространственной и частотной моде и линейные преобразования таких состояний.
4. Исследовать возможности синтеза новых поляризационных состояний бифотонов:
 - а) синтез и исследование ортогонально поляризованных пар фотонов, приготовленных из одинаково поляризованных пар фотонов, как в непрерывном, так и в импульсном режиме;
 - б) приготовление поляризационно-частотных белловских двухфотонных состояний и исследование их поляризационных свойств;
5. Исследовать влияние поглощения холостого излучения на двухфотонную интерференцию.
6. Разработать методику измерения дисперсии восприимчивостей различных порядков нелинейной среды по частотно-угловым спектрам рассеяния на поляритонах вблизи решеточных резонансов.

Научная новизна. Основные существенно новые результаты проведенных исследований состоят в следующем:

1. Теоретически и экспериментально исследовано соотношение между следующими характеристиками бифотонного поля: формой “провала”, наблюдаемого в эффекте антикорреляции, формой огибающей корреляционной функции первого порядка, в том
2. числе при использовании узкополосных фильтров, и корреляционной функцией второго порядка. Обнаружен эффект “расплывания” корреляционной функции второго порядка бифотона при его распространении в диспергирующей среде.
3. Исследовано влияние конечного спектра накачки на интерференцию четвертого порядка и эффект антикорреляции для бифотонных полей. Для эффекта антикорреляции впервые наблюдалось согласие экспериментальных данных с теоретическими; установлена причина отмечавшихся ранее расхождений между теорией и экспериментом.
4. Теоретически и экспериментально исследованы поляризационные свойства бифотонов, принадлежащих одной пространственной и частотной моде. Для таких бифотонов
 - предложено наглядное представление на сфере Пуанкаре;
 - сформулировано операциональное условие ортогональности;
 - предложен метод троичной кодировки квантовой информации;
 - на примере бифотонов с ортогонально поляризованными фотонами каждой пары экспериментально продемонстрированы поляризационные преобразования трех базисных состояний;
 - осуществлен синтез ортогонально поляризованных пар фотонов из пар одинаково поляризованных фотонов. Эксперимент выполнен как в непрерывном режиме, так и в режиме фемтосекундной импульсной накачки.
5. Экспериментально исследованы поляризационные свойства поляризационно-частотных белловских состояний, полученных интерферометрическим методом на основе СПР в коллинеарном частотно-невырожденном режиме. Показано, что одно из состояний (Ψ) представляет собой состояние “скалярного” света, ранее обсуждавшееся в литературе, в пределе малых интенсивностей бифотонного поля.
6. Проведен учет поглощения холостого излучения при нелинейной интерференции в случае произвольной геометрии эксперимента. Для случая схемы Юнга предложен метод измерения поглощения по видимости интерференционной картины.
7. Предложен метод измерения дисперсии комплексных восприимчивостей первого и второго порядка, а также мнимой части кубичной восприимчивости, по спектрам рассеяния на поляритонах вблизи решеточных резонансов.

Методическая ценность работы заключается в том, что в ней проводится ряд аналогий, например,

- между интерференцией бифотонных полей, рождающихся в различных пространственных областях и от различных импульсов накачки;
- между генерацией бифотонного поля от импульсной накачки и от непрерывной многомодовой накачки;
- между распространением в диспергирующей среде короткого импульса и бифотона;
- между представлением на сфере Пуанкаре поляризационного состояния одного фотона (кубита) и поляризационного состояния бифотона (кутрита);
- между интерференционным контуром Фано, наблюдавшимся ранее в спектрах возбуждения, и интерференционным контуром, наблюдающимся в угловых спектрах рассеяния на поляритонах вблизи решеточных резонансов.

Практическое значение диссертационной работы связано с возможностью применения полученных результатов в квантовой информатике и спектроскопии нелинейных кристаллов. С точки зрения квантовой информатики, бифотон представляет собой троичную единицу квантовой информации – кутрит. На сегодняшний день на основе кутритов разработан ряд протоколов передачи квантовой информации, которые, по сравнению с двоичными протоколами, обладают большей емкостью информации и более высоким уровнем секретности. Применения результатов диссертационной работы в спектроскопии связаны с возможностью измерения в нелинейных кристаллах дисперсии поглощения, а также дисперсии комплексных восприимчивостей различных порядков.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Можно выделить две независимые характеристики бифотонного поля: корреляционные функции первого и второго порядков. Соотношение между ними можно менять, пропуская бифотонное поле через прозрачную диспергирующую среду, в которой КФ второго порядка “расплывается”, аналогично короткому импульсу, и в дальней зоне приобретает форму, повторяющую форму спектра бифотонного поля, а КФ первого порядка не меняется. При наблюдении эффекта антикорреляции для бифотонного поля, полученного от непрерывной накачки, форма антикорреляционного “провала” соответствует вдвое сжатой и перевернутой огибающей корреляционной функции первого порядка.

2. Бифотоны, излученные в различные моменты времени, могут интерферировать в четвертом порядке по полю даже в случае, если интервал времени, разделяющий моменты их рождения, больше длины когерентности накачки. Такой эффект наблюдался экспериментально в двух случаях:

а) при генерации бифотонов от двух разделенных во времени когерентных импульсов накачки;

б) при генерации бифотонов от непрерывной накачки с несколькими продольными модами. При этом интервал времени между моментами рождения бифотонов должен быть кратен удвоенной длине резонатора накачки, умноженной на скорость света.

Необходимым условием наблюдения интерференции в обоих случаях является перекрытие амплитуд обоих бифотонов. Это достигается либо использованием узкополосных фильтров (случай а), либо пропусканием бифотонов через интерферометр с соответствующей разностью длин плеч (случай б).

3. При наблюдении эффекта антикорреляции для бифотонного поля, рождающегося от фемтосекундной импульсной накачки, форма “провала” является симметричной. Отмечавшаяся ранее в литературе асимметрия - следствие аппаратных эффектов.

4. Произвольное поляризационное состояние бифотонного поля, относящегося к одной пространственной и частотной моде, можно использовать для троичной кодировки квантовой информации.

4.1. Такое состояние имеет наглядное представление в виде пары точек на сфере Пуанкаре. При этом параметры Стокса для бифотона определяются суммой параметров Стокса для каждого из фотонов пары, а степень поляризации бифотона определяется углом, под которым пара точек видна из центра сферы. Для различения двух таких состояний можно применять следующий критерий ортогональности:

пусть на вход неполяризованного светоделиителя подается один из двух бифотонов, а в выходных каналах светоделиителя установлены поляризационные фильтры, выделяющие состояния поляризации, соответствующие второму бифотону, а затем фотодетекторы. Тогда отсутствие совпадений фотоотчетов детекторов равносильно ортогональности двух бифотонов.

4.2. Троичная кодировка квантовой информации может быть реализована с использованием трех взаимно ортогональных поляризационных состояний одномодовых бифотонов с ортогональной поляризацией фотонов в парах. Эти состояния, как любые состояния с одинаковой степенью поляризации, могут быть преобразованы друг в друга линейными поляризационными элементами.

4.3. Состояние “бифотона типа II” (пары ортогонально поляризованных фотонов) может быть приготовлено интерферометрическим способом из двух “бифотонов типа I” (пар одинаково поляризованных фотонов). Такой синтез осуществлен экспериментально как в режиме непрерывной накачки, так и в режиме фемтосекундной импульсной накачки.

5. Из четырех поляризационно-частотных двухфотонных белловских состояний три обладают “скрытой поляризацией”, то есть поляризованы в четвертом порядке по полю и неполяризованы во втором порядке, а одно состояние - синглетное состояние ψ^- - не обладает “скрытой поляризацией”. Свет в таком состоянии неполяризован во всех порядках по полю и является “поляризационно-скалярным”, т.е. для него обращаются в нуль флуктуации всех трех параметров Стокса.

6. Поглощение холостого излучения проявляется при наблюдении интерференции второго порядка для бифотонных полей:

6.1. При наличии поглощения для холостой волны в выражение для формы линии рассеяния входят корреляторы между равновесными полями в различных точках нелинейной среды на частоте холостой волны.

6.2. При наблюдении интерференции второго порядка в схеме Юнга спектры СПР позволяют по видности интерференционной картины измерить поглощение на частоте холостого излучения. По таким спектрам измерена дисперсия поглощения в кристалле йодноватой кислоты вблизи валентного колебания ОН - связи (в диапазоне $3300-5300 \text{ см}^{-1}$).

7. Угловая форма линии параметрического рассеяния (рассеяния на поляритонах) на частоте, находящейся в непосредственной близости от решеточных резонансов, содержит информацию о комплексных значениях восприимчивостей первого и второго порядков, а также мнимой части кубичной восприимчивости.

7.1. В общем случае эта форма линии представляет собой контур Фано, образованный за счет интерференции комбинационного и параметрического процессов, причем эффект интерференции заметен в том случае, когда мнимая часть квадратичной восприимчивости для рассматриваемой частоты сравнима с действительной.

7.2. В случае сильной интерференции комбинационного и параметрического вкладов (если мнимая часть квадратичной восприимчивости сравнима с действительной) по угловой форме линии рассеяния на поляритонах можно рассчитать дисперсию комплексных восприимчивостей первого и второго порядков. Для случая слабой интерференции можно применять обычный метод к-спектроскопии, который используется для нерезонансных участков спектра.

7.3. Измерена дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости, комплексной квадратичной восприимчивости и мнимой части кубичной восприимчивости кристалла йодноватой кислоты в диапазоне $1000-1200 \text{ см}^{-1}$, содержащем многочастичные возбуждения, а также фундаментальное колебание ОН-группы $\nu(\text{OH})$.

8. Сравнение результатов ν - спектроскопии СПР и данных, полученных в литературе методом КАРС с пространственно-временным разрешением, для одного и того же поляритона в кристалле йодата лития говорит о хорошем согласии данных по дисперсии групповой скорости поляритона. Для данных по времени жизни поляритона найдено незначительное различие между результатами, полученными обоими методами: измерения по спектрам СПР выявили наличие колебания второго порядка, не обнаруженное методом КАРС. Это различие может быть связано с тем, что измерения двумя методами проводились в разных температурных режимах.

9. Дисперсионные зависимости, измеренные в кристалле ниобата лития вблизи фонона на частоте 582 см^{-1} по частотным спектрам и по угловым спектрам, оказываются различными. В первом случае закон дисперсии описывается осцилляторной зависимостью без учета фононного затухания, а во втором случае - с учетом затухания.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 статьях в реферируемых журналах и докладывались на 25 международных и всероссийских конференциях. В том числе, результаты представлялись на международных конференциях по нелинейной оптике (С.-Петербург 1995, Москва 1998, Минск 2001), на Международных симпозиумах по лазерной физике (Прага 1997, Москва 2001, Братислава 2002), на Международных конференциях по Рамановской спектроскопии (Питтсбург 1996, Кейптаун 1998), на Международных конференциях по квантовой электронике (IQEC'94 и IQEC'96, Анахайм, EQEC'94, Амстердам, EQEC'96, Гамбург, CLEO/Pacific Rim, 1997, Чиба, CLEO/QELS'1999 и CLEO/QELS'2001, Балтимор, CLEO'2000, Ницца, QELS'2000, Сан-Франциско, IQEC'2002, Москва), на ежегодных конференциях американского оптического общества (OSA) (Провиденс 2000 и Лос-Анджелес 2001), на общероссийских семинарах по квантовой оптике (Москва 2000, 2001, 2002), на ежегодном семинаре памяти Д.Н.Клышко (Москва 2002, 2003).

Авторский вклад. Все изложенные в диссертации результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии в постановке задач, построении теории и проведении эксперимента.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, объединенных в три части, заключения и списка литературы, содержащего 215 наименований. Она содержит 55 рисунков и 2 таблицы.

Во **Введении** содержится краткий обзор работ по коррелированным состояниям в оптике и обосновывается постановка задачи.

Часть I, содержащая две главы, посвящена **спектральным свойствам бифотонных полей**.

В **первой главе** содержатся результаты, относящиеся к различным методам исследования двухфотонных полей. Эти методы включают измерение корреляционных функций первого и второго порядков, а также наблюдение эффекта антикорреляции. Первый раздел главы (1.1) содержит только литературные данные. Во втором разделе содержится оригинальный материал - сравнение формы антикорреляционного “провала” и формы огибающей корреляционной функции первого порядка, в том числе при использовании узкополосных фильтров. Последние два раздела – также оригинальные. В них рассматривается преобразование корреляционной функции второго порядка бифотонного поля. В разделе 1.3 теоретически и экспериментально показано, что при распространении пучка бифотонов через диспергирующую среду (оптическое волокно) происходит “расплывание” корреляционной функции второго порядка при неизменной корреляционной функции первого порядка. В разделе 1.4 рассматривается преобразование корреляционной функции второго порядка при наличии резонатора для холостого излучения. В этом случае корреляционная функция приобретает вид системы пиков с убывающими амплитудами, по высоте которых можно определить время жизни холостого фотона в резонаторе.

Во **второй главе** исследуется влияние спектра накачки на свойства двухфотонных полей, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии. Отдельно рассматриваются случаи непрерывной и фемтосекундной импульсной накачки. В разделе 2.1 для случая фемтосекундной импульсной накачки вычисляются корреляционные функции первого и второго порядков. В разделе 2.2 теоретически и экспериментально исследуется влияние спектра накачки на двухфотонную интерференцию. В первой части раздела (подраздел 2.2.1) продемонстрирована интерференция бифотонов, рождающихся от двух разделенных во времени когерентных импульсов накачки. Подраздел 2.2.2 посвящен исследованию интерференции бифотонов, рождающихся от непрерывной накачки с несколькими продольными модами и разделенных временным интервалом, большим длины когерентности накачки, но кратным удвоенной длине резонатора накачки, умноженной на скорость света. При этом поля накачки в моменты времени,

соответствующие рождению бифотонов, когерентны, и наблюдается двухфотонная интерференция. В последнем разделе главы (раздел 2.3) экспериментально исследуется эффект антикорреляции для бифотонного поля, получаемого от фемтосекундной импульсной накачки. В противоположность более ранним работам, наблюдаемая форма антикорреляционного “провала” хорошо согласуется с теорией. На основе проведенных измерений сделан вывод о том, что наблюдавшиеся ранее аномалии связаны с аппаратными эффектами.

В части II работы, включающей две главы, исследуются поляризационные свойства бифотонных полей. Эта часть является центральной частью диссертации. Рассматривается наименее изученный случай коллинеарных (однопучковых) полей. **Третья глава** посвящена поляризационным состояниям бифотонных полей в одной пространственной и частотной моде и их преобразованиям. В первом разделе главы предлагается наглядное представление таких состояний на сфере Пуанкаре. Следующий раздел (3.2) посвящен измерению поляризационного состояния по числу совпадений в схеме Брауна-Твисса с выделением определенных поляризационных состояний в каналах. На основе такой схемы в разделе 3.3 сформулировано операциональное условие ортогональности произвольно поляризованных бифотонов. Таким образом, первые три раздела Главы 3 содержат только теоретические результаты. Разделы 3.4 и 3.5 - экспериментальные. Раздел 3.4 непосредственно не относится к поляризационной оптике бифотонов, но в нем рассматривается эффект “интерференции независимых бифотонов”, на котором основаны поляризационные преобразования бифотонных полей и синтез новых поляризационных состояний бифотонов. В разделе 3.5 рассматриваются линейные поляризационные преобразования одномодовых бифотонов. В эксперименте были получены бифотоны с ортогональной поляризацией фотонов в парах - так называемые неполяризованные бифотоны, или “бифотоны типа II”. Показано, что из таких состояний можно составить базис, который позволяет (раздел 3.6) осуществить троичное кодирование квантовой информации.

В четвертой главе описано приготовление и исследование ряда новых бифотонных состояний: пар произвольно (но ортогонально) поляризованных фотонов, поляризационно-частотных белловских состояний и, в частности, синглетного состояния, представляющего собой полностью неполяризованный свет. В разделе 4.1 пары ортогонально поляризованных фотонов синтезируются из пар одинаково поляризованных фотонов. Исследован эффект антикорреляции для синтезированных состояний и проведено сравнение формы антикорреляционного “провала” с формой огибающей корреляционной функции первого порядка. Эксперимент проводился как в режиме

непрерывной накачки (раздел 4.1.1), так и в режиме фемтосекундной импульсной накачки (раздел 4.1.2). В последнем случае дополнительный результат эксперимента состоит в синтезе в фемтосекундном режиме “бифотонов типа II”, для которых на выходе из подготовительной части установки отсутствует обычная задержка сигнального фотона относительно холостого и поэтому наблюдается двухфотонная интерференция с высокой видностью. Раздел 4.2 посвящен эксперименту по синтезу поляризационно-частотных однопучковых белловских состояний и исследованию их поляризационных свойств. Продемонстрировано наличие “скрытой поляризации” (поляризации в четвертом порядке по полю) для трех из четырех белловских состояний. Для четвертого состояния (синглетного) продемонстрировано отсутствие “скрытой поляризации”. В последнем разделе главы (раздел 4.3) теоретически показано, что двухфотонный свет в синглетном состоянии должен обладать свойствами скалярного света: флуктуации трех параметров Стокса для него должны быть равны нулю.

Часть III содержит одну главу (**главу 5**), в которой рассматривается ситуация, когда частота одного из двух коррелированных фотонов оказывается близкой к частоте решеточного резонанса. Для случая не слишком сильной близости к резонансу (раздел 5.1) проводится учет поглощения при нелинейной интерференции. В подразделе 5.1.1 получено общее выражение для интерференционной формы линии СПР из пространственно-разделенных областей в случае произвольной геометрии эксперимента. В подразделе 5.1.2 проведен расчет для конкретного случая схемы Юнга; там же описан эксперимент по измерению поглощения в кристалле йодноватой кислоты по видности интерференции второго порядка в схеме Юнга. В разделе 5.2 рассматривается вид угловых спектров СПР (РП) в существенно резонансном случае, когда велико не только поглощение, но и мнимая часть квадратичной восприимчивости. Для этого случая в подразделе 5.2.1 предложен способ измерения комплексных восприимчивостей первого и второго порядков, а также мнимой части кубичной восприимчивости, по угловым спектрам рассеяния (к-спектроскопия). В подразделе 5.2.2 этот способ применен для экспериментального исследования дисперсии восприимчивостей различных порядков в кристалле йодноватой кислоты в диапазоне $1000 - 1200 \text{ см}^{-1}$, содержащем многофонные возбуждения, а также фундаментальное колебание ОН-группы. В разделе 5.3 к резонансным участкам спектров РП применяется метод частотных спектров (ω -спектроскопия). Здесь проводится сравнение между данными этого метода, полученными для поляритона в кристалле йодата лития, и литературными данными, полученными методом спектроскопии КАРС с пространственным и временным разрешением. В том же разделе методами ω -спектроскопии и к-спектроскопии поляритонов исследуются спектры

РП в кристалле ниобата лития. Обнаружено различие между дисперсионными зависимостями, полученными по частотным и угловым спектрам.

В Заключение сформулированы основные выводы работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проанализированы различные методы исследования бифотонных полей, сводящиеся к измерению корреляционных функций первого и второго порядка.

1.1. Показано, что для бифотонного поля существует принципиальное различие между корреляционными функциями первого и второго порядка. В частности, выполнен эксперимент, в котором за счет дисперсионного расплывания меняется КФ второго порядка, в то время как КФ первого порядка остается неизменной.

1.2. Показано, что при регистрации эффекта антикорреляции форма антикорреляционного “провала” совпадает с перевернутой и вдвое сжатой огибающей КФ первого порядка.

2. Исследованы свойства бифотонного света при его генерации в поле накачки с конечной шириной спектра.

2.1. Зарегистрирована интерференция четвертого порядка по полю для бифотонов, генерируемых в различные моменты времени:

а) в поле фемтосекундной импульсной накачки;

б) в поле непрерывной накачки с несколькими продольными модами.

2.2. Экспериментально исследован эффект антикорреляции для бифотонного поля, генерируемого при СПР типа II в поле фемтосекундной импульсной накачки. Показано, что при этом антикорреляционный “провал”, в соответствии с существующей теорией, имеет плоскую симметричную форму.

3. Исследованы поляризационные свойства бифотонных полей, генерируемых при СПР в коллинеарном режиме.

3.1. Разработано наглядное представление произвольно поляризованных бифотонов, принадлежащих одной пространственной и частотной моде (“одномодовых” бифотонов”). Получены простые выражения для параметров Стокса и степени поляризации.

3.2. Получено операциональное условие ортогональности “одномодовых” бифотонов, позволяющее экспериментально выделять бифотон из множества ему ортогональных.

- 3.3. Экспериментально выполнены поляризационные преобразования “одномодовых” бифотонов, переводящие три ортогональных базисных поляризационных состояния друг в друга. Предложена троичная кодировка квантовой информации на основе “одномодовых” произвольно поляризованных бифотонов.
 - 3.4. Экспериментально синтезированы и исследованы новые бифотонные состояния с поляризационными свойствами бифотонов, генерируемых при СПР типа II и спектральными свойствами бифотонов, генерируемых при СПР типа I. Эксперимент выполнен как в непрерывном, так и в фемтосекундном импульсном режиме.
 - 3.5. Для бифотонного поля, принадлежащего одной пространственной и двум частотным модам (“однопучковые” бифотоны) экспериментально приготовлены четыре поляризационно-частотных белловских состояния. Показано, что три состояния поляризованы в четвертом порядке по полю, а одно (синглетное) состояние неполяризовано во всех порядках по полю.
4. Исследованы поля, генерируемые при СПР в случае слабого поглощения холостого излучения, а также при рассеянии на поляритонах (РП).
- 4.1. Получено соотношение для распределения интенсивности бифотонного поля, учитывающее влияние поглощения на интерференцию второго порядка бифотонных полей. Для случая схемы Юнга по видности интерференционной картины измерено поглощение в кристалле йодноватой кислоты вблизи валентного колебания ОН-связи на частоте 2950 см^{-1} .
 - 4.2. Теоретически и экспериментально исследована угловая форма линии рассеяния на поляритонах вблизи решеточных резонансов. Показано, что эта форма линии имеет интерференционный вид за счет конкуренции вкладов параметрического и комбинационного процесса. Разработан метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости, комплексной квадратичной восприимчивости и мнимой части кубичной восприимчивости по угловым спектрам (“k-спектрам”). Этим методом измерена дисперсия комплексных восприимчивостей различных порядков в кристалле йодноватой кислоты в диапазоне $900 - 1300 \text{ см}^{-1}$, содержащем многофононные состояния.
 - 4.3. На примере поляритона в кристалле йодата лития проведено сравнение между параметрами поляритонов, измеренными по частотным спектрам РП (?-спектроскопия) и литературными данными, измеренными методом КАРС с пространственным и временным разрешением. Результаты в целом говорят о

хорошем согласии данных обоих методов. Для данных по времени жизни поляритона отмечено небольшое отличие: методом РП обнаружено колебание второго порядка, не зарегистрированное методом КАРС.

- 4.4. На примере спектров РП в кристалле ниобата лития показано, что частотные и угловые спектры РП, вообще говоря, дают различный вид закона дисперсии поляритонов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. А.В.Бурлаков, С.П.Кулик, Л.А.Кривицкий, М.В.Чехова, Измерение кутритов. Оптика и спектроскопия, **94**, №5, 744-750 (2003).
2. А.В.Бурлаков, М.В.Чехова, Поляризационная оптика бифотонов. Письма в ЖЭТФ, **75**, №8, 505-512 (2002).
3. М.В.Чехова, Двухфотонный спектр. Письма в ЖЭТФ, **75**, №5, 271-272 (2002).
4. А.В.Бурлаков, С.П.Кулик, Г.О.Рытиков, М.В.Чехова, Генерация бифотонного света в поляризационно-частотных белловских состояниях. ЖЭТФ, **122**, 738-745 (2002).
5. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, O.A.Karabutova, D.Yu.Korystov, Yu.B.Mamaeva, and S.P.Kulik, Interference of Biphoton Fields. Laser Physics, **12**, №5, 825-834 (2002).
6. A.Valencia, M.V.Chekhova, A.S.Trifonov, and Y.H.Shih. Two-Photon Wave Packet in a Dispersive Medium. Phys.Rev.Lett., **88**, 183601-183605 (2002).
7. А.А.Жуков, Г.А.Масленников, М.В.Чехова, Операциональное условие ортогональности одномодовых бифотонов – кутритов. Письма в ЖЭТФ, **76**, 696-700 (2002).
8. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, O.A.Karabutova, and S.P.Kulik, Collinear two-photon state with spectral properties of type-I and polarization properties of type-II spontaneous parametric down-conversion: Preparation and testing. Phys. Rev. A, **64**, 041803-1 – 041803-4 (2001).
9. Y.H.Kim, V.Berardi, M.V.Chekhova, and Y.H.Shih, Anticorrelation effect in femtosecond-pulse pumped type-II spontaneous parametric down-conversion. Phys. Rev. A, **64**, 011801-1 – 011801-4 (2001).
10. А.В.Бурлаков, Ю.Б.Мамаева, А.Н.Пенин, М.В.Чехова, Трехчастотная интерференция с участием поляритонов. ЖЭТФ, **120**, №1, 67-75 (2001).
11. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, O.A.Karabutova, S.P.Kulik, Biphoton Interference with a Multimode Pump. Phys. Rev. A, **63**, 053801-1 – 053801-4 (2001).
12. Y.H.Kim, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, M.H.Rubin, Y.H.Shih, Interferometric Bell State Preparation Using Femtosecond Pulse Pumped Spontaneous Parametric Down Conversion. Phys. Rev. A, **63**, 062301-062312 (2001).
13. M.D'Angelo, M.V.Chekhova, and Y.H.Shih, Two-Photon Diffraction and Quantum Lithography. Phys. Rev. Lett., **87**, No 1, 013602-1 – 013602-4 (2001).

14. Y.H.Kim, V.Berardi, M.V.Chekhova, A.Garuccio, and Y.H.Shih, Temporal Indistinguishability and Quantum Interference. *Phys. Rev. A*, **62**, 043820-1 – 043820-4 (2000).
15. Y.H.Kim, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, M.H.Rubin, Y.H.Shih, First-Order Interference of Nonclassical Light Emitted Spontaneously at Different Times. *Phys.Rev.A*. **61**, 0518032R-0518036R (2000).
16. А.В.Бурлаков, Д.Н.Клышко, С.П.Кулик, М.В.Чехова, Интерференция четвертого порядка между независимыми бифотонами. Письма в ЖЭТФ, **69**, №11, 788-794 (1999).
17. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, A.N.Penin, Propagation and decay of equilibrium phonon polaritons studied via near-forward Raman scattering. *Optics Communications*, **165**, 39-44 (1999).
18. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, O.A.Karabutova, S.P.Kulik, Polarization State of a Biphoton: Quantum Ternary Logic. *Phys. Rev. A*, **60**, R4209 – R4212 (1999).
19. Y.H.Kim, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, M.H.Rubin, Y.H.Shih, Quantum Interference by Two Temporally Distinguishable Pulses. *Phys.Rev.A*, **60**, R37-E40 (1999).
20. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, D.N.Klyshko, S.P.Kulik, A.N.Penin, D.V.Strekalov, and Y.H.Shih, Interference Effects in Spontaneous Two-photon Parametric Scattering from Two Macroscopic Regions. *Phys. Rev. A*, **56**, 4,3214-3225 (1997).
21. А.В.Бурлаков, Д.Н.Клышко, С.П.Кулик, А.Н.Пенин, М.В.Чехова, Интерференция между спонтанным двухфотонным излучением из двух макроскопических областей. Письма в ЖЭТФ, **65**, вып.1, 20-25 (1997).
22. A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, A.N.Penin, Relation Between the Photon Statistics in Parametrically Conjugated Modes. *Laser Physics*, **6**, №6, 1077-1081 (1996).
23. M.V.Chekhova and A.N.Penin, Study of Second-order Excitations in α -Iodic Acid Crystal by Means of Polariton k-Spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, **24**, 581-584 (1993).
24. В.М.Иванов, Т.В.Лаптинская, А.Н.Пенин, М.В.Чехова, Анизотропия многочастичных состояний в поляритонном спектре монокристалла йодноватой кислоты. ФТТ, **3**, 68-72 (1989).