

На правах рукописи

Рытиков Георгий Олегович

**НЕКЛАССИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯЦИИ  
МНОГОМОДОВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ**

01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники Физического факультета  
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова  
и  
на кафедре прикладной математики и моделирования систем  
Факультета экономики и менеджмента  
Московского государственного университета печати

Научный руководитель: Кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Карасев Валерий Павлович (ФИАН)

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
Быков Владимир Павлович  
Центр естественно-научных исследований ИОФ РАН

Кандидат физико-математических наук,  
Башаров Асхат Масхудович  
РНЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Российский государственный педагогический  
Университет имени А.И.Герцена, факультет физики

Защита состоится « 25 » марта 2009 года в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.45 в МГУ имени М.В.Ломоносова по  
адресу 119991, Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, НИИ ядерной физики  
имени Д.В.Скобельцына, 19 корпус, ауд.2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 19 » февраля 2009 года

Ученый секретарь Совета по  
защите докторских и кандидатских  
диссертаций Д 501.001.45,  
к.ф.-м.н.

О.М.Вохник

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Данная работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию корреляций многомодового неклассического света в перепутанных по различным переменным состояниях.

Неклассическим называется свет, для которого распределение амплитуды поля ( $P$ -распределение Глаубера-Сударшана) принимает отрицательные значения или является нерегулярной обобщенной функцией. Эквивалентным  $P$ -распределению способом описания свойств неклассического света является полный набор статистических моментов поля, задаваемых корреляционными функциями Глаубера различных порядков.

Количество мод светового поля определяется способами его генерации и детектирования. Условно выделяют поляризационные, частотные и угловые моды поля. Если опираться на модель плоских гармонических волн, то одномодовый свет характеризуется одной частотной, одной угловой (пространственной) и одной поляризационной модой. Снятие вырождения по любой из этих характеристик, вообще говоря, делает поле многомодовым.

Перепутанным называется такое состояние многокомпонентной квантовой системы, волновая функция которого не может быть факторизована, т.е. представлена в форме произведения волновых функций компонент рассматриваемой системы. Можно условно выделить перепутывание по дискретным и перепутывание по непрерывным переменным, для характеристики которых в данной работе используются соответственно мера Вутерса и мера Федорова.

Интерес к неклассическим световым полям (НСП) связан с возможностью их использования в фундаментальной метрологии, в экспериментах по проверке различных гипотез квантовой теории и в квантовой информатике.

Применение НСП позволяет убедиться в состоятельности квантовой механики путем разрешения парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена за счет экспериментальной проверки неравенств Белла. Использование НСП в метрологических целях позволяет преодолеть соответствующие классическим представлениям ограничения на предельно достижимую точность и чувствительность измерений. В квантовой информатике известно множество теоретических протоколов квантовой криптографии и вычислительных алгоритмов для квантового компьютера, в которых перепутанные по различным переменным и факторизованные состояния НСП выступают в качестве носителей информации. В системах квантовых коммуникаций и квантовых вычислений возможно значительное увеличение скоростей обработки и передачи данных, помехоустойчивости связи и степени защищенности информации. Увеличение числа коррелированных фотонов приводит к возрастанию плотности кодирования информации, увеличение количества независимых мод – к увеличению ширины информационного канала, поэтому особое внимание уделяется многомодовым неклассическим световым полям, характеризующимся большими числами коррелированных фотонов.

Наиболее распространенными источниками неклассического света являются процессы параметрического рассеяния. Известны многочисленные эксперименты по генерации неклассического света в оптических параметрических усилителях в результате спонтанного (двухфотонный свет) и вынужденного («сильно» сжатый вакуум) параметрического рассеяния света. Неклассические корреляции двухфотонного света и сжатого вакуума проявляются, соответственно, в форме аномально высоких значений нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности  $g^{(2)}$  и в форме двухмодового сжатия. Измеряемое значение корреляционной функции  $g^{(2)}$  и степени двухмодового сжатия по-разному зависят от интенсивности накачки, коэффициента параметрического

усиления, потерь в оптическом тракте, условий детектирования, квантовых эффективностей детекторов и др. факторов. В данной работе внимание сосредоточено на ранее не исследовавшихся зависимостях измеряемой степени двухмодового сжатия и нормированной корреляционной функции  $g^{(2)}$  от величин угловых апертур детекторов при различных значениях мер перепутывания по угловым переменным. Данная задача актуальна в рамках обеспечения возможности частотной фильтрации без использования интерференционных фильтров, наличие которых в оптическом тракте понижает измеряемую степень двухмодового сжатия, а также в рамках выбора способа регистрации неклассических корреляций, в большей степени отвечающего конкретным условиям эксперимента.

Другой актуальной задачей исследования является получение НСП в перепутанных состояниях. В работе рассматривается возможность генерации НСП в перепутанных состояниях при коллинеарном параметрическом рассеянии в полидоменных кристаллах. Из литературы известно, что в монодоменных кристаллах, квадратичная восприимчивость  $\chi^{(2)}$  которых отлична от нуля, в результате коллинеарного параметрического рассеяния генерируется многомодовый неклассический свет в факторизованных состояниях. Известно также, что нелинейные кристаллы (моно- и полидоменные) используются в качестве эффективных поляризационных преобразователей. Однако совокупность процессов рождения пар коррелированных фотонов и их поляризационного преобразования в полидоменном кристалле ранее не рассматривалась. На современном этапе недостатком генерации НСП в перепутанных состояниях в полидоменных кристаллах является отсутствие технических возможностей по управлению состоянием генерируемого света. Преимущество такого способа получения НСП в перепутанных состояниях состоит в отсутствии необходимости юстировки и согласования элементов оптической системы, предназначенной для приготовления перепутанного состояния.

В ряде работ НСП в перепутанном состоянии «приготавливается» в результате интерференции излучений от нескольких источников неклассического света в факторизованных состояниях. Соответствующие работы отличаются режимами параметрического рассеяния; переменными, по которым происходит перепутывание; геометриями экспериментов; способами детектирования результирующего состояния света и т.д. Преимуществом представляемой в данной работе экспериментальной схемы является возможность приготовления многомодового по частотным переменным НСП во всех четырех максимально перепутанных по переменным «частота-поляризация» состояниях Белла в одной угловой моде. Приготовление НСП в одной угловой моде позволяет обходиться только одной линией оптического волокна при передаче закодированных данных. Большое количество независимых частотных мод позволяет осуществлять по этому волокну широкополосную передачу данных. Приготовление полного набора состояний Белла позволяет использовать данную экспериментальную схему при реализации опирающихся на максимально-перепутанные состояния протоколов квантовой криптографии и алгоритмов квантовой информатики.

Исследование поляризационных свойств многомодового неклассического света в состояниях, перепутанных по поляризационным переменным, актуально в связи с необходимостью обеспечения возможности управления поляризационным состоянием неклассического света. В классической оптике поляризация света проявляется в зависимости интенсивности света, прошедшего через поляризационный фильтр, от линейных поляризационных преобразований, осуществляемых над исследуемым излучением, например, с помощью фазовых пластинок. Механизмом деполяризации в классической оптике является стохастизация начальных фаз плоских гармонических электромагнитных волн. Известно,

что неклассический двухфотонный свет в максимально перепутанных состояниях Белла неполяризован с точки зрения классической оптики. При этом из теоретических работ Д.Н.Клышко известно, что скрытая поляризация двухфотонного света проявляется в зависимости величины нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности от линейных поляризационных преобразований. Отсутствие скрытой поляризации свидетельствует о полной деполяризации двухфотонного света. Из теоретических работ В.П.Карасева известно, что существует состояние «поляризационно-скалярный свет» – НСП с четным числом фотонов, характеризующееся двухмодовым сжатием по любой паре ортогональных поляризационных мод. Поляризационное сжатие по любой паре ортогональных поляризационных мод свидетельствует об инвариантности моментов НСП к линейным поляризационным преобразованиям, то есть о полной деполяризации поляризационно-скалярного света. Механизм деполяризации поляризационно-скалярного света кардинально отличается от классического и носит название «когерентного». Таким образом, актуальность экспериментального исследования поляризационных свойств двухфотонного света, перепутанного по переменным «частота-поляризация», обусловлена необходимостью дальнейшего изучения когерентного механизма деполяризации света и установления связи между синглетным состоянием Белла и поляризационно-скалярным светом.

Таким образом, **актуальность данной работы** обусловлена необходимостью выявления новых и совершенствования известных способов получения и управления состояниями НСП, необходимостью экспериментального исследования когерентного механизма деполяризации НСП и необходимостью выбора оптимального способа детектирования многомодовых неклассических световых полей.

**Целью** диссертационной работы является генерация, исследование свойств и количественных характеристик многомодовых неклассических световых полей в перепутанных состояниях.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка нового, адекватного для применений в квантовой информатике и оптической связи способа экспериментального приготовления и исследование поляризационных свойств многомодового двухфотонного света во всех четырех состояниях Белла, максимально перепутанных по переменным «частота-поляризация».
2. Проверка возможности генерации двухфотонного света в перепутанных состояниях при СПР в полидоменном кристалле и расчет степени многомодового поляризационного сжатия, меры перепутывания Вутерса по переменным «частота-поляризация» и парциальных степеней поляризации компонент соответствующего двухфотонного света.
3. Расчет и сравнение зависимостей измеряемой степени двухмодового сжатия по угловым переменным и измеряемой нормированной угловой корреляционной функции Глаубера второго порядка  $g^{(2)}$  от величин угловых апертур детекторов и от степени перепутывания по угловым переменным многомодового сжатого вакуума.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Экспериментально исследованы поляризационные свойства многомодового двухфотонного света, приготовленного во всех четырех перепутанных по переменным «частота-поляризация» состояниях Белла. Установлено, что двухфотонный свет в синглетном состоянии Белла  $|\Psi^-\rangle$  не обладает скрытой поляризацией, в отличие от двухфотонного света в состояниях  $|\Phi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^+\rangle$ , образующих белловский триплет.

2. Показано, что при увеличении степени перепутывания состояния по переменным «частота-поляризация» возрастает мера синглетности состояния двухфотонного света, полученного при СПР в полидоменном кристалле. Установлено взаимнооднозначное соответствие между парциальными степенями поляризации и мерой Вутерса перепутывания по переменным «частота-поляризация». На этой основе предложен способ контроля качества приготовления и восстановления волновой функции состояния многомодового двухфотонного света.
3. Вычислены зависимости измеряемой степени двухмодового сжатия и измеряемой нормированной корреляционной функции  $g^{(2)}$  от угловых апертур используемых детекторов при различных значениях меры Федорова перепутывания сжатого вакуума по угловым переменным. Теоретически показано, что наличие неклассических корреляций может быть установлено путем измерения степени двухмодового сжатия в том случае, когда непосредственное измерение корреляционной функции  $g^{(2)}$  оказывается неэффективным.

### **Научная и практическая ценность работы**

Способ приготовления и результаты исследования поляризационных свойств многомодового двухфотонного света в поляризационно-частотных состояниях могут найти применение в квантовой криптографии и системах, использующих квантовые вычисления. Предложенный способ контроля качества приготовления и восстановления волновой функции состояния многомодового двухфотонного света может быть полезен для метрологических нужд. Выявленные соотношения между степенями измеряемого двухмодового сжатия и мерами перепутывания могут использоваться при оптимизации параметров оптических систем связи, использующих состояние сжатого вакуума в качестве носителя информации.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Представленная экспериментальная установка позволяет готовить многомодовый двухфотонный свет в состояниях, характеризующихся произвольной мерой перепутывания по переменным «частота-поляризация» (в частности, во всех четырех максимально перепутанных состояниях Белла), в одной пространственной моде.
2. Полученный в эксперименте многомодовый двухфотонный свет в синглетном состоянии Белла  $|\Psi\rangle$  является реализацией поляризационно-скалярного света при малом значении коэффициента параметрического усиления и не обладает свойством скрытой поляризации.
3. При параметрическом рассеянии света в полидоменных кристаллах, обладающих ненулевой квадратичной восприимчивостью  $\chi^{(2)}$ , возможна генерация сжатого вакуума в перепутанных состояниях.
4. Парциальные степени поляризации  $P_s, P_i$  компонент и мера перепутывания  $C$  состояния исследуемого двухфотонного света по поляризационным переменным связаны взаимнооднозначным соответствием  $C^2 + P_{s,i}^2 = 1$ .
5. Измеряемая степень двухмодового сжатия (1-NRF) возрастает, а измеряемое значение нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка  $g^{(2)}$  убывает с увеличением угловых апертур детекторов.
6. Вид зависимостей (1-NRF) и  $g^{(2)}$  от угловых апертур детекторов определяются значением меры перепутывания состояния исследуемого неклассического света по угловым переменным.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах:

- 1) Quantum Electronics and Laser Science Conference (2000, San Francisco, USA).
- 2) Quantum Electronics and Laser Science Conference (2001, Baltimore, USA).
- 3) Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2001» (2002, Санкт-Петербург, РФ).

- 4) Вторая международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (2002, Санкт-Петербург, РФ).
- 5) International Quantum Electronics Conference (2002, Moscow, Russia).
- 6) 2-ой семинар памяти Д.Н.Клышко (2002, Москва, РФ).
- 7) X Международные чтения по квантовой оптике (2007, Самара, РФ).
- 8) 5-ый семинар памяти Д.Н.Клышко (2007, Москва, РФ).
- 9) Пятая международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (2008, Санкт-Петербург, РФ).
- 10) Международная конференция «Комбинационное рассеяние - 80 лет исследования» (2008, Москва, РФ).
- 11) XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (2008, Vilnius, Lithuania).
- 12) Международная конференция «Поляризационная оптика - 2008» (2008, Москва, РФ).

**Личный вклад соискателя.** Все изложенные в диссертации новые результаты получены автором самостоятельно. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов исследования осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами публикаций.

**Публикации.** Основные материалы диссертации опубликованы в 9 работах; из них 4 – в реферируемых журналах, 5 – в трудах международных конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 162 наименований, изложена на 124 страницах и содержит 21 рисунок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** приводится обоснование выбора темы диссертационной работы и ее актуальности. Сформулированы цель и решаемые задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем диссертации. Содержатся сведения об апробации работы и публикациях.

**Глава I** содержит обзор литературы по теме диссертации, в котором анализируются способы генерации, управления состоянием и детектирования неклассических световых полей (НСП); рассматриваются способы теоретического описания поляризационных свойств НСП и обсуждается неклассические корреляциями, перепутывание состояний, двухмодовое и многомодовое сжатие НСП. Отмечается возможность усовершенствования экспериментальной установки, предназначенной для управления состоянием двухфотонного света, характеризующимся одной пространственной, одной частотной и двумя поляризационными модами [<sup>1</sup>], для приготовления перепутанных по переменным «частота-поляризация» состояний многомодового двухфотонного света. Обосновывается необходимость применения концепции поляризационного квазиспина [<sup>2</sup>] к анализу поляризационных свойств и поляризационно-частотного перепутывания двухфотонного света. Обсуждается возможность установления взаимосвязей между двухмодовым сжатием и перепутыванием по непрерывным (угловым) переменным [<sup>3</sup>] для сжатого вакуума. На основании выводов обзора дается развернутая формулировка задач исследования.

---

<sup>1</sup> A.V.Burlakov, M.V.Chekhova, O.A.Karabutova, D.N.Klyshko and S. P. Kulik; Polarization state of a biphoton: Quantum ternary logic // Phys.Rev.A, vol.60, R4209, 1999, p.R4209-R4212

<sup>2</sup> В.П.Карасев, Концепция поляризационного квазиспина в поляризационной оптике // Письма в ЖЭТФ, том 84, вып.12, с.759-763, 2006

<sup>3</sup> M.V.Fedorov, M.A.Efremov, A.E.Kazakov, K.W.Chan, C.K.Law and J.H.Eberly; Spontaneous emission of a photon: Wave-packet structures and atom-photon entanglement // Phys. Rev. A 72, 032110 (2005)

**Глава II** посвящена описанию экспериментальной установки и результатов исследования поляризационных свойств многомодового двухфотонного света, характеризующегося широким спектром частотных, одной пространственной и двумя поляризационными модами, приготовленного во всех четырех перепутанных по переменным «частота-поляризация» состояниях Белла.

В разделе **II.1** описывается экспериментальная установка (Рис.1) и процедура приготовления двухфотонного света в состояниях Белла. В качестве накачки используется излучение функционирующего в непрерывном режиме гелий-кадмиевого (HeCd) лазера с центральной длиной волны спектра излучения 325 нм. Поляризованное излучение накачки направляется на неполяризационный 50% делитель пучка (NPB). Две пространственно-разделенные области кристалла  $\text{LiIO}_3$  освещаются двумя пучками квазимонохроматического поляризованного излучения накачки практически одинаковой интенсивности. В кристалле  $\text{LiIO}_3$  происходит СПР типа I. При этом обе компоненты (сигнальная и холостая) генерируемого двухфотонного света поляризованы одинаково. Режим параметрического рассеяния (коллинеарность и степень частотного вырождения) контролируется по характерному частотно-угловому спектру. Управление режимом СПР осуществляется малыми поворотами кристалла, изменяющими угол между оптической осью кристалла и направлением распространения накачки. Для оптимизации частотной фильтрации в блоке детектирования кристалл ориентируется таким образом, чтобы разность длин волн компонент бифотонного света была порядка ширины пропускания используемого интерференционного фильтра. Ширина пропускания фильтра составляла ~40 нм. Был выбран коллинеарный частотно-невырожденный режим, при котором максимальные значения интенсивностей сигнальной и холостой компонент двухфотонного света наблюдались на длинах волн 635 и 665 нм.



пластинку – отражается от поляризационного делителя пучка (PBS). На выходе из интерферометра Маха-Цандера  $k$ -ая мода двухфотонного света находилась в состоянии, описываемом волновой функцией вида:

$$|\Psi_k\rangle \sim \left(1 + C_k \left\{ \hat{a}_V^+(\omega_{s,k}) \hat{a}_V^+(\omega_{i,k}) + e^{i\Delta\varphi_k} \cdot \hat{a}_H^+(\omega_{s,k}) \hat{a}_H^+(\omega_{i,k}) \right\}\right) |vac\rangle \quad (3)$$

Здесь  $|\Psi_k\rangle$  – волновая функция  $k$ -ой моды бифотонного света;  $\Delta\varphi_k$  – разность фаз, вносимая элементами экспериментальной установки между вертикально и горизонтально поляризованными компонентами  $k$ -ой моды бифотона.

После прохождения через широкополосную фазовую пластинку, расположенную «после» PBS, волновая функция *поляризационного* состояния многомодового двухфотонного света имеет вид

$$|\Psi\rangle \sim c_1|H_s\rangle|H_i\rangle + c_2|H_s\rangle|V_i\rangle + c_3|V_s\rangle|H_i\rangle + c_4|V_s\rangle|V_i\rangle \quad (4)$$

Здесь  $|H_s\rangle, |H_i\rangle$  и  $|V_s\rangle, |V_i\rangle$  – волновые функции соответственно горизонтально и вертикально поляризованных компонент бифотонного поля во всех частотных модах;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – стационарные комплексные коэффициенты разложения перепутанного состояния  $|\Psi\rangle$  по базису возможных поляризационных состояний рассматриваемой квантовой системы. Квадраты модулей коэффициентов  $c_1, c_2, c_3, c_4$  зависят от угла ориентации фазовой пластинки  $\chi$  и от среднего фазового сдвига  $\varphi$ , вносимого между пучками с помощью подвижного зеркала  $M_2$ .

Если полуволновая пластинка ориентирована под углом 0 или  $\pi/4$ , то на выходе из пластинки свет, находившийся в состоянии (4) на входе, будет находиться в состоянии

$$|\Phi^+\rangle \sim |H_s\rangle |H_i\rangle + e^{i\varphi} |V_s\rangle |V_i\rangle \quad (5)$$

За счет подбора соответствующей задержки  $\varphi$  из (6) получаются выражения для состояний Белла  $|\Phi^+\rangle$  ( $\varphi=0$ ) или  $|\Phi^-\rangle$  ( $\varphi=\pi$ ), примешанных к состоянию вакуума. Для получения коллинеарного частотно-невырожденного

двухфотонного света в состоянии  $|\Psi^+\rangle$  необходимо ориентировать полуволновую пластинку под углом  $\pi/8$ , и установить фазовую задержку  $\varphi=\pi$ . Для получения состояния  $|\Psi^-\rangle$  из состояния  $|\Psi^+\rangle$  необходимо использовать специальную кварцевую пластинку, для которой разность набегов фаз между обыкновенной и необыкновенной компонентами падающего поля для волн сигнальной и холостой компонент составляет  $\pi$  радиан.

Помещая такую пластинку в пучок двухфотонного света в состоянии  $|\Psi^+\rangle$ , на выходе получим синглетное состояния Белла

$$|\Psi^-\rangle \sim |H_s\rangle |V_i\rangle - |V_s\rangle |H_i\rangle. \quad (6)$$

В разделе II.2 приводятся результаты экспериментального корреляционного анализа поляризации двухфотонного света в полученных состояниях Белла. Исследование поляризации полученного двухфотонного света осуществляется с помощью интерферометра Хенбери Брауна–Твисса. Измеряется количество фотоотчетов и количество совпадений импульсов фототока за время наблюдений, пропорциональные интенсивностям и корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности компонент двухфотонного света. Для исследования поляризационных свойств многомодового двухфотонного света в поляризационно-частотных состояниях Белла устанавливаются зависимости скоростей фотоотчетов и скорости совпадений импульсов фототока от углов поворота широкополосных полу- и четвертьволновых фазовых пластинок. На рис.3 представлены зависимости чисел совпадений импульсов фототока для двухфотонного света в состояниях триплета –  $\{|\Phi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^+\rangle\}$  и в синглетном состоянии  $|\Psi^-\rangle$ .

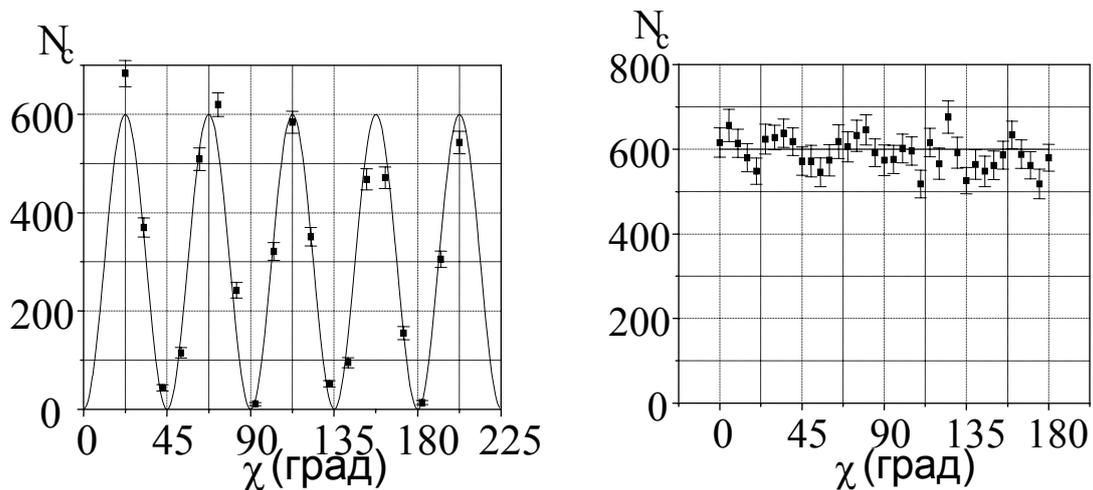


Рис.2а) Зависимости чисел совпадений импульсов фототока за 200 секунд от углов поворотов (широкополосной) полуволновой фазовой пластинки для триплетного (слева) и синглетного (справа) состояний.

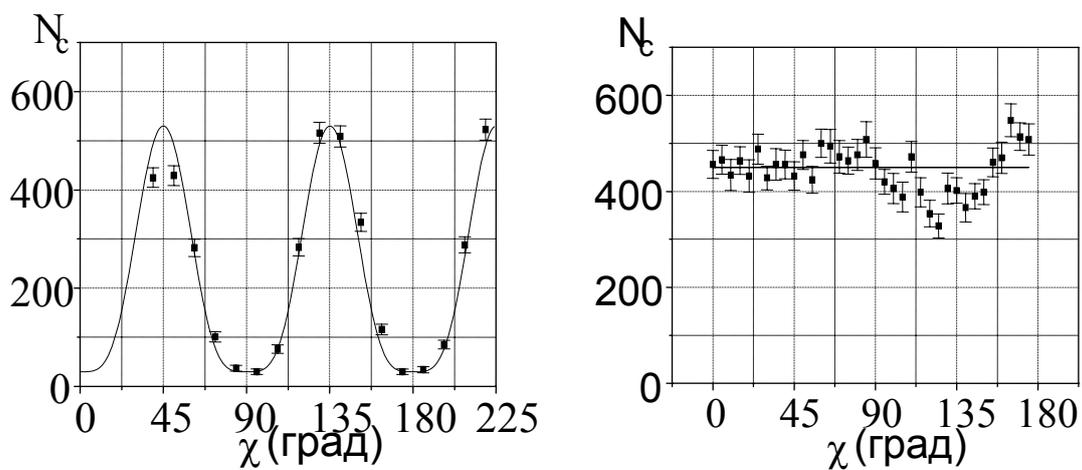


Рис.2б) Зависимости чисел совпадений импульсов фототока за 200 секунд от углов поворотов (широкополосной) четвертьволновой фазовой пластинки для триплетного (слева) и синглетного (справа) состояний.

Опираясь на формализм матриц Джонса производится оценка характера зависимости корреляционной функции Глаубера второго порядка от углов ориентации полу- и четвертьволновых фазовых пластинок в лабораторном поляризационном базисе. Найденная форма зависимостей хорошо совпадает с результатами эксперимента.

**Глава III** посвящена установлению взаимосвязи между перепутыванием и многомодовым поляризационным сжатием четырехмодового двухфотонного света, полученного при параметрическом рассеянии в полидоменном кристалле.

В разделе **III.1.1** (по литературе), опираясь на общее решение задачи о кластерной динамике в моделях многофотонных взаимодействий, изложенное в работах В.П.Карасева, рассмотрена динамика параметрического рассеяния в монодоменном, оптически неактивном кристалле. В качестве динамических переменных рассматриваются как традиционные операторы рождения и уничтожения фотонов, так и коллективные операторы рождения и уничтожения бифотонных кластеров; используется приближение квантовой накачки. Решение систем уравнений Гейзенберга относительно указанных типов динамических переменных с последующим усреднением по когерентным и обобщенным когерентным состояниям задает условия стационарности и характер динамики вблизи неподвижных точек фазового пространства.

В разделе **III.1.2** показана возможность генерация четырехмодового двухфотонного света в перепутанном состоянии при параметрическом рассеянии в среде, осуществляющей линейные поляризационные преобразования над генерируемым светом. На основании гамильтониана, описывающего процессы параметрического рассеяния и поляризационных преобразований в такой среде

$$\hat{H} \sim \left\{ \begin{array}{l} + \omega_p \hat{b}_p^+ \hat{b}_p + \omega_s \hat{a}_s^+ \hat{a}_s + \omega_i \hat{a}_i^+ \hat{a}_i + g \cdot \hat{a}_s^+ \hat{a}_i^+ \hat{b}_p + g^* \hat{a}_s \hat{a}_i \hat{b}_p^+ + \\ + \Omega_s \hat{b}_s^+ \hat{a}_s + \Omega_i \hat{b}_i^+ \hat{a}_i + \Omega_s^* \hat{a}_s^+ \hat{b}_s + \Omega_i^* \hat{a}_i^+ \hat{b}_i \end{array} \right\}, \quad (7)$$

составлена система уравнений Гейзенберга для коллективных переменных модели и найдены ее стационарные решения. Рассмотрены частные случаи малости коэффициента параметрического преобразования и отсутствия «поляризационной активности» среды. Установлено, что в общем случае возможна генерация двухфотонного света в перепутанном состоянии в среде, осуществляющей линейные поляризационные преобразования над генерируемым в ней светом (поляризационно-активной среде).

В разделе **III.1.3** показано, что процесс параметрического рассеяния в полидоменном кристалле в некотором смысле эквивалентен процессу параметрического рассеяния в поляризационно-активной среде. Из приведенного решения системы уравнений Гейзенберга следует, что в полидоменном кристалле возможно «одновременное» протекание процессов параметрического рассеяния и поляризационного преобразования. Следовательно, возможна и генерация двухфотонного света в перепутанных состояниях при параметрическом рассеянии в полидоменном кристалле.

В разделе **III.2.1** излагаются элементы формализма поляризационного квазиспина: определяются основные поляризационные операторы и соответствующие (парциальные и коллективные) поляризационные параметризации базисных состояний многомодового квантового света, а также основные поляризационные характеристики, удобные для операционального анализа поляризационных свойств.

В разделе **III.2.2** рассчитаны поляризационные характеристики и меры перепутывания состояния для двухфотонного света, экспериментально полученного Д.А.Калашниковым под руководством С.П.Кулика а) при параметрическом рассеянии в полидоменном кристалле  $\text{KN}_2\text{PO}_4$ , и б) при распространении через тот же кристалл без параметрического рассеяния.

Опираясь на концепцию поляризационного квазиспина и результаты восстановления волновых функций состояний двухфотонного света, было показано, что помимо классического стохастического механизма деполяризации в процессе СПР в полидоменном кристалле проявляется когерентный механизм деполяризации. Установлено, что мера синглетности, характеризующая этот механизм (мера синглетности  $X_m$ ), возрастает при увеличении степени перепутывания по поляризационно-частотным переменным. Полученное В.П.Карасевым общее соотношение между парциальными степенями поляризации  $P_s, P_i$  компонент многомодового сжатого вакуума и мерой Вутерса  $C$  перепутывания по поляризационно-частотным переменным проверено для случая рассматриваемого двухфотонного света:  $C^2 + P_s^2 = 1$ .

**Глава IV** посвящена сравнению зависимостей измеряемой нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности  $g^{(2)}$  и измеряемой степени двухмодового сжатия многомодового сжатого вакуума (1-NRF) от величин угловых апертур детекторов  $D\theta_{s,i}$  при различных значениях меры перепутывания  $R$  состояния сжатого вакуума по угловым переменным.

В разделе **IV.1** (по литературе) приводятся определения степени двухмодового сжатия (1-NRF), нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности  $g^{(2)}$  и меры Федорова перепутывания по угловым переменным, а также устанавливаются зависимости этих величин от квадрата амплитуды бифотона.

В разделе **IV.2** рассматриваются аналитические решения систем уравнений Гейзенберга, соответствующих случаям больших и малых значений меры Федорова перепутывания. Показано, что при больших мерах перепутывания степень двухмодового сжатия стремится к единице.

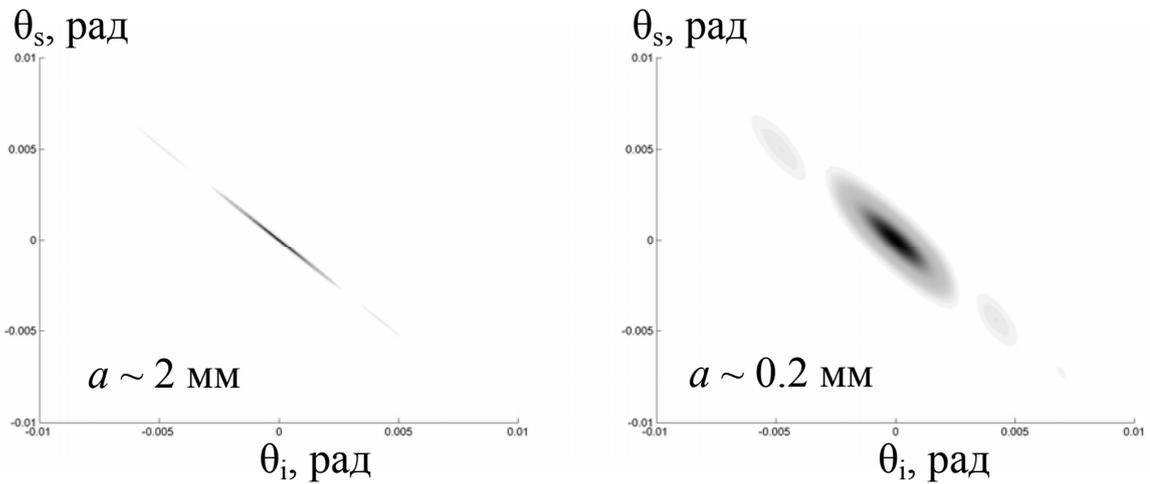


Рис.4а) Проекция квадратов амплитуд бифотонов на плоскости углов рассеяния при двух значениях диаметра пучка накачки.

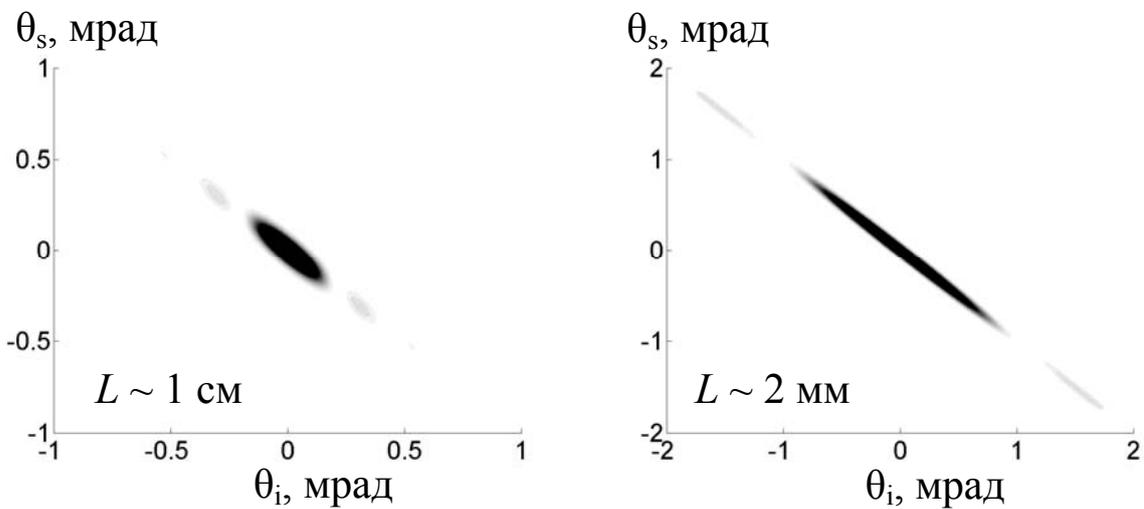


Рис.4б) Проекция квадратов амплитуд бифотонов на плоскости углов рассеяния при двух значениях толщин кристаллов.

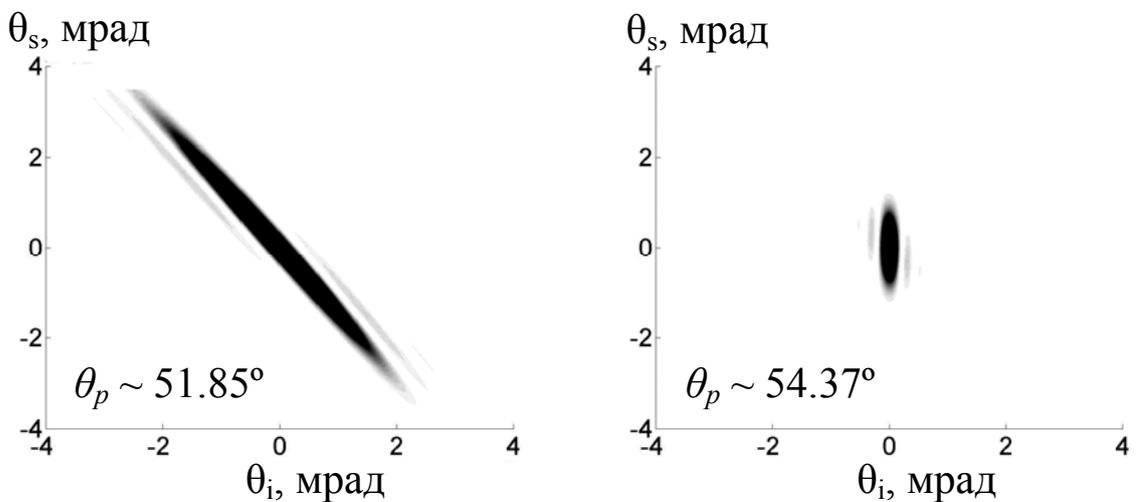


Рис.4в) Проекция квадратов амплитуд бифотонов на плоскости углов рассеяния при двух значениях углов между направлением распространения накачки и оптической осью кристалла.

В разделе **IV.3** представлены основные результаты моделирования зависимостей: 1) вида проекции квадрата амплитуда бифотона от диаметра и толщины объема нелинейного взаимодействия; 2) нормированной корреляционной функции  $g^{(2)}$  и 3) фактора подавления шума NRF от угловых апертур детекторов. Из Рис.4а,б видно, что мера перепутывания возрастает при увеличении диаметра области нелинейного взаимодействия и при уменьшении толщины нелинейного кристалла. Из Рис.4в следует, что мера перепутывания зависит от угла между направлением распространения накачки и оптической осью кристалла. Из анализа Рис.5 следует, что измеряемая нормированная корреляционная функция  $g^{(2)}$  убывает, а измеряемая степень двухмодового сжатия (1-NRF) возрастает при увеличении угловых апертур детекторов. Угловая апертура детектора, при которой  $g^{(2)}$  и NRF достигают своих асимптотических значений, определяется величиной меры перепутывания по угловым переменным.

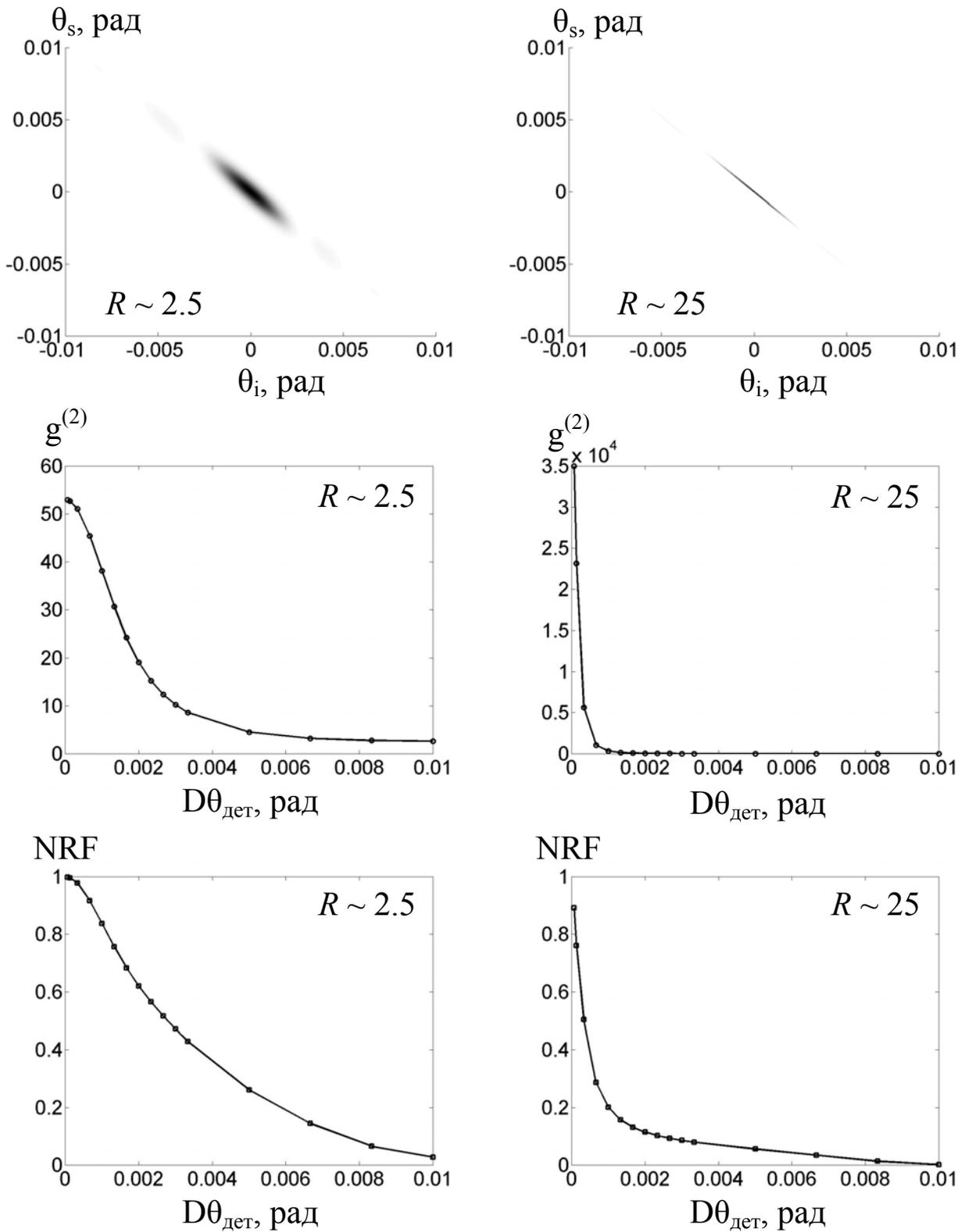


Рис.5 Измеряемая нормированная корреляционная функция  $g^{(2)}$  и измеряемый фактор подавления шума NRF в зависимости от угловой апертуры детекторов при двух значениях меры Федорова перепутывания состояния по угловым переменным.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении сформулированы основные **результаты и выводы** диссертационной работы:

1) Многомодовый двухфотонный свет в одной пространственной моде экспериментально приготовлен в состояниях Белла, перепутанных по переменным «частота-поляризация». В предложенной экспериментальной схеме возможна генерация реализующего когерентный механизм деполяризации поляризационно-скалярного света.

2) Экспериментально исследованы поляризационные свойства многомодового двухфотонного света во всех четырех состояниях Белла. Показано, что двухфотонный свет в синглетном состоянии Белла  $|\Psi^-\rangle$  не обладает (в отличие от состояний триплета) скрытой поляризацией (по Д.Н.Клышко), т.е. интенсивности и корреляционная функция интенсивностей  $g^{(2)}$  сигнальной и холостой компонент двухфотонного света в состоянии  $|\Psi^-\rangle$  инвариантны к линейным поляризационным преобразованиям.

3) Теоретически показано, что генерация четырехмодового двухфотонного света в перепутанном состоянии возможна при спонтанном параметрическом рассеянии в полидоменном кристалле. При этом установлено, что мера синглетности состояния, характеризующая когерентный механизм деполяризации, возрастает при увеличении меры перепутывания по переменным «частота-поляризация».

4) Установлена взаимосвязь парциальных степеней поляризации и меры Вутерса  $S$  перепутывания состояния двухфотонного света при параметрическом рассеянии в полидоменном кристалле. Предложен способ контроля качества приготовления и качества восстановления волновых

функций перепутанных по переменным «частота-поляризация» чистых состояний многомодового двухфотонного света.

5) Теоретически показано, что для сжатого вакуума характер зависимостей измеряемой угловой корреляционной функции Глаубера второго порядка  $g^{(2)}$  и измеряемой степени двухмодового сжатия (1-NRF) от угловых апертур детекторов определяется значением меры перепутывания состояния по угловым переменным. Установлена возможность частотной фильтрации без существенного понижения степени двухмодового сжатия посредством выбора определенных угловых апертур детекторов в том случае, когда рассматриваемый неклассический свет характеризуется большим значением меры перепутывания по угловым переменным.

б) Теоретически показано, что для сжатого вакуума значение измеряемой нормированной корреляционной функции Глаубера второго порядка по интенсивности  $g^{(2)}$  убывает, а степень измеряемого двухмодового сжатия (1-NRF) возрастает при увеличении угловых апертур детекторов. Установлено, что детектирование степени двухмодового сжатия оказывается способом исследования неклассических корреляций многомодовых световых полей при высоком уровне случайных совпадений импульсов фототока в интерферометре Хенбери Брауна-Твисса, т.е. в том случае, когда прямое измерение  $g^{(2)}$  неэффективно.

Публикации в рецензируемых журналах:

- 1) А.В.Бурлаков, С.П.Кулик, Г.О.Рытиков, М.В. Чехова. Генерация бифотонного света в поляризационно-частотных белловских состояниях. // ЖЭТФ, 2002, т.122, вып.4(10), с.738-745
- 2) Д.А.Калашников, В.П.Карасев, С.П.Кулик, А.А.Соловьев, Г.О.Рытиков. Генерация перепутанных состояний в полидоменных кристаллах дигидрофосфата калия. // Письма в ЖЭТФ, 2008, т.87, вып.1, с.66-71
- 3) Г.О.Рытиков, М.В.Чехова. Детектирование двухмодового сжатия и степень перепутывания по непрерывным переменным при параметрическом рассеянии света. // ЖЭТФ, 2008, т.134, вып.6, с.1082-1092
- 4) Т.Ш.Исхаков, Е.Д.Лобаева, А.Н.Пенин, Г.О.Рытиков, М.В.Чехова. Два способа регистрации неклассических корреляций при параметрическом рассеянии света. // Письма в ЖЭТФ, 2008, т. 88, вып.10, с.757-761

Публикации в трудах международных конференций:

- 1) Burlakov A.V., Chekhova M.V., Karabutova O.A., Kulik S.P., Rytikov G.O.; Biphotons generated from a multimode pump: revival of an interference // QELS'00, Proc.of CLEO/QELS-2000, QThD92.
- 2) Burlakov A.V., Chekhova M.V., Karabutova O.A., Kulik S.P., Rytikov G.O.; Preparation and measurement of biphotons in given polarization state // QELS'01, Technical Digest, p.70-71, 2001.
- 3) А.В.Бурлаков, С.П.Кулик, Г.О.Рытиков, М.В.Чехова; Поляризационные свойства двухфотонного света в поляризационно-частотных состояниях Белла // Сборник трудов конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2002», с.62-63, 2002
- 4) Д.А.Калашников, В.П.Карасев, С.П.Кулик, Г.О.Рытиков; Динамическое формирование перепутанных поляризационных состояний многомодового света в полидоменных сегнетоэлектриках. Теория и эксперимент // Сборник трудов конференции «Фундаментальные проблемы оптики-2008», с.40-41, 2008;
- 5) Исхаков Т.Ш., Лобаева Л.Д., Рытиков Г.О., Чехова М.В; Корреляции фотонов и поляризационное сжатие при параметрическом рассеянии света // Поляризационная оптика-2008, Тезисы докладов, с.57-58

---

Заказ № 27/02/09 Подписано в печать 06.02.2009 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1

---

ООО "Цифровичок", тел.(495) 797-75-76; (495) 649-83-30

*www.cfr.ru; e-mail: info@cfr.ru*