

На правах рукописи

Исхаков Тимур Шамильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ И  
НЕКЛАССИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ ИМПУЛЬСНЫХ  
СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ**

01.04.21 - лазерная физика

**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

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук  
Чехова Мария Владимировна

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
профессор Вятчанин Сергей Петрович,  
физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.  
Доктор физико-математических наук  
Фофанов Яков Андреевич,  
Институт аналитического приборостроения РАН.

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт  
имени Е.К. Завойского РАН.

Защита состоится <<14>> мая 2009 года в 17<sup>30</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.31 при МГУ имени М.В. Ломоносова по  
адресу: 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, МГУ, дом 1, стр. 62, корпус  
нелинейной оптики, аудитория имени С.А. Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан <<\_\_>> \_\_\_\_\_ 2009 года

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 501.001.31, кандидат физ.-мат. наук, доцент

Т.М. Ильинова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию статистических свойств импульсных световых полей. В работе предложен и апробирован метод измерения нормированных корреляционных функций интенсивностей (НКФИ) Глаубера в импульсном режиме. Определены и измерены предельные значения видности в интерференции третьего и четвертого порядка для классических источников. Исследованы зависимости основных статистических характеристик светового поля (нормированных корреляционных функций интенсивности и степени двухмодового сжатия) при параметрическом рассеянии света от основных параметров эксперимента. Экспериментально наблюдалась значительная степень подавления флуктуаций наблюдаемых Стокса относительно уровня дробового шума при регистрации сжатого вакуума на выходе однопроходового параметрического усилителя.

Появление импульсных лазеров сыграло ключевую роль в развитии лазерной физики и нелинейной оптики. Концентрация энергии света в коротких импульсах находит широкое применение как в фундаментальных исследованиях быстро протекающих процессов, так и в прикладных задачах передачи квантовой информации. Использование импульсного излучения позволяет исследовать широкий круг физических явлений, от эффектов, носящих спонтанный характер и наблюдаемых при слабых интенсивностях (например, спонтанное параметрическое рассеяние света), до процессов, которые происходят только под действием высокой пиковой интенсивности лазерного излучения (например, параметрическая сверхлюминесценция). Особый интерес представляет переход от спонтанного параметрического рассеяния света к режиму параметрической сверхлюминесценции, а именно изменение статистических свойств излучения при этом переходе.

Как правило, исследование статистических свойств излучения связано с измерением нормированных корреляционных функций, но методы измерения НКФИ для импульсных световых полей не разработаны. Хотя совпадения фототсчетов двух или нескольких детекторов регистрируются во многих работах, в том числе и для импульсного излучения, как правило, измеряется лишь абсолютное число совпадений, а не соотношение между числом совпадений и числами единичных отсчетов. В некоторых случаях результат измерения нормируется на число случайных совпадений, которое определяется косвенно, по величине корреляций между соседними импульсами излучения. Однако этот метод применим только для излучения с большой (сотни мегагерц) частотой повторения импульсов.

В данной работе исследовано влияние на форму корреляционной функции следующих факторов: временного профиля лазерного импульса, разрешения схемы совпадений, а также эффекта «мертвого» времени детектора. Работа в импульсном режиме позволяет избавиться от влияния шумов и значительно повысить эффективность измерений.

В квантовой оптике большое внимание уделяется генерации многофотонных состояний света. В большинстве случаев считается, что высокая видность интерференции интенсивностей служит признаком неклассического поведения. В частности, для двухфотонного света видность интерференции второго порядка равна 100%, в то время как для классических полей предел видности интерференции второго порядка равен лишь 50%. Поэтому, получая видность выше чем 50% во втором порядке интерференции, можно говорить о неклассическом характере поля. Но предел видности многофотонной интерференции для классических источников до сих пор не определен, поэтому нет однозначности в определении характера поля по значениям видности. В работе использовался предложенный в первой главе метод измерения

корреляционных функций импульсных световых полей при исследовании трехфотонной интерференции для двух независимых источников с когерентной и квазитепловой статистикой в схеме Юнга.

Генерация многофотонных состояний света в большинстве случаев связана с процессом СПР. Особенность этого процесса заключается в сильной корреляции интенсивностей сигнального и холостого излучения на выходе параметрического усилителя. При регистрации этого излучения нормированная корреляционная функция второго порядка по интенсивности принимает аномально большие значения относительно единичного фоновое уровня, соответствующего когерентной статистике поля. При переходе к режиму параметрической сверхлюминесценции (ПСЛ) исследование флуктуаций световых полей методом измерения НКФИ значительно усложняется. Контраст истинных совпадений на фоне случайных практически пропадает. В этом случае корреляции интенсивностей проявляются при измерении другой характеристики – степени двухмодового сжатия. Свет по-прежнему сохраняет неклассические свойства, но теперь они проявляются в подавлении флуктуаций разностной интенсивности сигнального и холостого пучков. Если пучки имеют разные поляризации, то наблюдается поляризационное сжатие.

Из всего вышесказанного следует **актуальность** работы, обусловленная фундаментальным интересом к природе корреляций интенсивностей световых полей классической и неклассической природы. Изложенный материал охватывает основные методы исследования статистических свойств излучения и может найти практическое применение в схемах передачи квантовой информации.

**Целью диссертационной работы** являлось:

1. Разработка и апробация метода измерения нормированных корреляционных функций интенсивности для импульсного излучения.
2. Исследование интерференции Хэнбери Брауна - Твисса высших порядков для классических полей.
3. Сравнение двух статистических характеристик светового поля: НКФИ и степени двухмодового сжатия при параметрическом рассеянии света. Исследование неклассических корреляций при переходе от спонтанного параметрического рассеяния к режиму параметрической сверхлюминесценции.
4. Исследование поляризационного сжатия на выходе однопроходового параметрического усилителя.

**Практическая ценность** диссертации состоит в возможном использовании полученных результатов при реализации фундаментальных и прикладных задач квантовой оптики:

- для коммуникации при использовании импульсных световых полей
- для абсолютной калибровки аналоговых детекторов
- для реализации протоколов квантовой информации с использованием дискретных и непрерывных переменных

**Научная новизна** связана с тем, что в работе впервые:

1. Разработан и применен метод измерения нормированных корреляционных функций Глаубера для импульсных световых полей.
2. Исследована интерференция Хэнбери Брауна - Твисса третьего и четвертого порядков для классических полей, определены максимальные значения видности для когерентных и тепловых полей.

3. Экспериментально исследована зависимость степени двухмодового сжатия при параметрическом рассеянии света от основных параметров эксперимента, в том числе от объема детектирования.
4. Наблюдалась значительная степень подавления шума (3 дБ) наблюдаемых Стокса относительно уровня дробового шума в схеме прямого детектирования сжатого вакуума.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Нормированная корреляционная функция интенсивности (НКФИ)  $n$ -го порядка для импульсного светового поля может быть рассчитана при известном значении среднего числа  $n$ -кратных совпадений и средних чисел фотоотсчетов в каждом детекторе за время импульса, времени разрешения схемы совпадений и формы импульса.
2. Видность интерференции Хэнбери Брауна - Твисса высших порядков по интенсивности для двух независимых классических источников растет с порядком интерференции. Теоретически показано, что видность интерференции третьего и четвертого порядков для источников когерентного поля составляет 81.8% и 94.4%, соответственно, в то время как для источников теплового поля видность достигает значений 60% и 77.8%, соответственно.
3. Квантовая эффективность детекторов может быть определена по величине подавления флуктуаций разностного фототока при регистрации сжатого вакуума на выходе однопроходового параметрического усилителя.
4. Степень двухмодового сжатия и НКФИ второго порядка для сжатого вакуума на выходе однопроходового параметрического усилителя принципиально по-разному зависят от основных параметров эксперимента. В частности, двухмодовое сжатие не зависит от коэффициента

параметрического преобразования, а с ростом числа регистрируемых мод степень двухмодового сжатия растет, в то время как НКФИ в обоих случаях убывает.

5. Предложена и реализована экспериментальная схема широкополосного источника сжатого вакуума с подавлением флуктуаций произвольного параметра Стокса.

**Апробация работы.** Результаты работы прошли апробацию на следующих международных и российских конференциях: **XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQO'2008)**, Вильнюс, Литва, 20–23 сентября 2008 г; **XV Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO 2008)**, Белград, Сербия, 30 мая - 3 июня, 2008 г; **XII школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики»**, Звенигород, Россия, 23-26 ноября 2008 г; **XI международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия»**, Казань, Россия, 25 - 27 октября 2007 г; **Central European Workshop on Quantum Optics 2007 (CEWQO 2007)**, Палермо, Италия, 1- 5 июня 2007 г; **International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2007)** Минск, Белоруссия, 28 мая – 1 июня 2007; **V Семинар Д.Н. Клышко**, Москва, Россия, 21-23 мая 2007 г; **The Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS 2007)**, Балтимор, США, 6-11 мая 2007 г; **XI International Conference on Quantum Optics (ICQO'2006)**, Минск, Беларусь, 26-31 мая 2006 г. и др.

**Личный вклад автора.** Все изложенные в диссертации результаты оригинальны и получены автором самостоятельно. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов исследования

осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами публикаций.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 работ: из них 7 опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК России, 2 работы – в трудах конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований, изложена на 120 страницах и содержит 26 рисунков.

## 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 «Исследование корреляционных функций интенсивности импульсных световых полей»** посвящена разработке метода измерения нормированных корреляционных функций интенсивности Глаубера для импульсных световых полей. Разработанный метод был апробирован (были измерены НКФИ второго порядка для когерентного и квазитеплого поля) и использовался при исследовании НКФИ второго порядка для излучения параметрического рассеяния при переходе от спонтанного параметрического рассеяния (СПР) к параметрической сверхлюминесценции (ПСЛ).

Первый раздел этой главы содержит обзор литературы, в котором рассмотрены виды неклассического света и способы их приготовления.

Обсуждаются признаки неклассических корреляций, которые удобно наблюдать в эксперименте. Показано, что в режиме слабых интенсивностей при параметрическом рассеянии света неклассические корреляции световых полей наблюдаются при измерении нормированных корреляционных функций интенсивностей, а в режиме больших интенсивностей – при регистрации двухмодового сжатия. В разделе 1.2 показано, что измеряемая величина НКФИ  $n$ -го порядка для импульсного светового поля может быть рассчитана при известном среднем значении  $n$ -кратных совпадений и среднем числе фотоотсчетов в каждом детекторе за импульс, а также зависит от временного профиля лазерного импульса и разрешения схемы совпадений. Раздел 1.3 состоит из двух подразделов. В пункте 1.3.1 описывается экспериментальная установка, на которой проводилась апробация метода измерения НКФИ в импульсном режиме на примере импульсного когерентного и квазитеплого поля. В пункте 1.3.2 рассмотрено влияние режима работы счетного детектора на форму корреляционной функции. Показано, что при переходе от линейного режима работы детекторов к нелинейному режиму начинает сказываться эффект «мертвого времени», что приводит к наблюдаемому сужению корреляционной функции. Раздел 1.4 посвящен экспериментальному исследованию НКФИ второго порядка при переходе от СПР к ПСЛ. Процесс СПР наблюдается при слабых интенсивностях светового поля, при этом сигнал рассеянного излучения прямо пропорционален интенсивности накачки. При больших интенсивностях накачки наблюдается ПСЛ, при этом наблюдается экспоненциальная зависимость сигнала от мощности накачки. Поэтому, меняя интенсивность накачки, можно проследить переход от СПР к ПСЛ.

На Рис. 1 (а, б) представлена зависимость сигнала параметрического рассеяния от средней мощности накачки  $P$ , полученная в эксперименте. Действительно, при малой интенсивности накачки наблюдалась линейная

зависимость сигнала параметрического рассеяния от средней мощности накачки, при большой – проявился экспоненциальный рост.

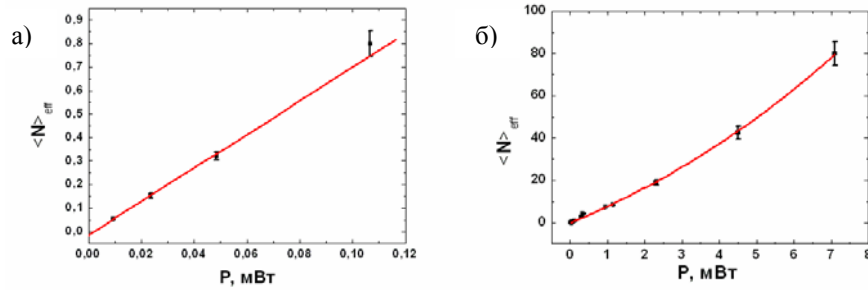


Рис. 1. Зависимость сигнала параметрического рассеяния от средней мощности накачки  $P$  в режиме СПР (а) и режиме ПСЛ (б).

Результаты экспериментального исследования поведения корреляционной функции второго порядка по интенсивности для излучения параметрического рассеяния при переходе от СПР к режиму ПСЛ представлены на Рис. 2.

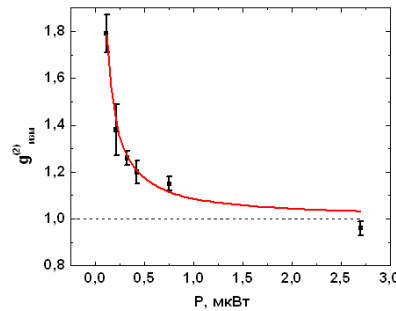


Рис. 2 Зависимость корреляционной функции  $g_{\text{изм}}^{(2)}$  для параметрического рассеяния света от средней мощности накачки  $P$ .

Экспериментально наблюдаемое значение НКФИ второго порядка для параметрического рассеяния света при многомодовом приеме зависит от числа фотонов на моду  $N$ :

$$g_{\text{изм}}^{(2)} = 1 + \frac{1}{mN}, \quad (1)$$

где  $m$  - число регистрируемых мод, равное отношению объема детектирования к объему когерентности. Поэтому с ростом интенсивности накачки значение НКФИ, наблюдаемое в эксперименте, будет приближаться к значению  $g^{(2)} = 1$ , также наблюдаемому и для когерентного поля. Таким образом, при переходе от СПР к ПСЛ неклассические корреляции интенсивностей при измерении НКФИ второго порядка не проявляются.

**Глава II «Многофотонная интерференция классических световых полей»** посвящена расчету максимальных значений видности в интерференции третьего и четвертого порядков для классических полей, а также экспериментальному исследованию такой интерференции для когерентного и квазитеплого поля. Показано, что с ростом порядка интерференции видность интерференционной картины растет. Максимальное значение достигается для когерентного поля. Так в интерференции третьего порядка предел видности равен 81.8%, а в интерференции четвертого порядка - 94.4%.

В пункте 2.1 приведен краткий обзор литературных данных по вопросам, связанным с двумя видами интерференции: с разностной и суммарной фазой. Наблюдаемая видность интерференции второго порядка для двухфотонного неклассического света близка 100%<sup>1</sup>, в то время как для классических полей предельная видность интерференции второго порядка равна

<sup>1</sup> R. Ghosh, L. Mandel, Observation of nonclassical effects in the interference of two photons, Phys. Rev. Lett. **59**, 1903 (1987).

50% и наблюдается для когерентного поля. Поэтому значение видности интерференции второго порядка, превышающее 50%, может служить признаком неклассичности. В работе<sup>2</sup> показано, что максимальная видность интерференции с суммарной фазой для классических полей убывает с порядком интерференции. Оказывается, что для случая интерференции типа Хэнбери Брауна - Твисса для двух независимых источников классических полей при переходе к интерференции высших порядков по интенсивности видность растет и приближается к 100%. В пункте 2.2 описывается принципиальная схема эксперимента по наблюдению интерференции третьего порядка в схеме Юнга (Рис.3.).

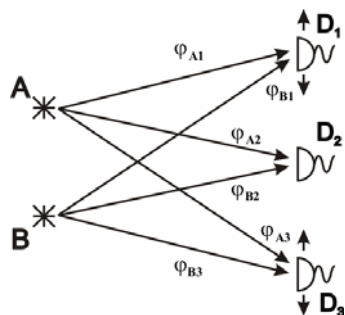


Рис. 3. Схема Юнга для наблюдения интерференции третьего порядка. Излучение двух источников A и B регистрируется в дальней зоне тремя детекторами  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ . В эксперименте измеряется число совпадений фотоотсчетов при сканировании одного или двух детекторов

Получены выражения для расчета НКФИ третьего и четвертого порядков, как функций относительных разностей фаз, определяемых разностью оптических путей от источников до детекторов. Определены максимальные значения

<sup>2</sup> А.В. Белинский, Д.Н. Клышко, Интерференция света и теорема Белла, УФН, **163**, №8 (1993).

видности, которые наблюдаются для источников когерентного и теплового светового поля. В пункте 2.3 описана экспериментальная установка, а также процедура измерения НКФИ третьего порядка. В пункте 2.4 обсуждаются полученные результаты Рис.4 (а, б).

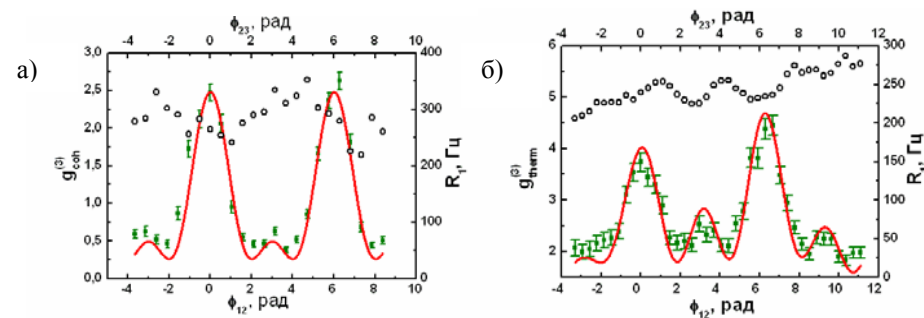


Рис. 4.

Интерференционная картина в третьем порядке по интенсивности для случая источников с когерентной (а) и квазитепловой (б) статистикой, полученная при одновременном сканировании детекторов  $D_1$  и  $D_3$  навстречу друг другу (квадраты), и поведение нормированного числа единичных отсчетов в одном из сканируемых каналов (кружки). Сплошной линией показана теоретическая зависимость.

Экспериментально были получены значения видности в интерференции третьего порядка для когерентного поля  $(74 \pm 7)\%$ , для теплового –  $(38 \pm 3)\%$

В разделе 2.5 предложен альтернативный метод измерения НКФИ, основанный на цифровой обработке изображений спекловой картины, полученных с помощью цифровой камеры в дальней зоне. В данном пункте представлены экспериментальные зависимости НКФИ третьего и четвертого порядков для когерентного и квазитеплого поля. Полученные экспериментальные значения видности для когерентного поля в интерференции третьего порядка  $(73 \pm 1)\%$ , а в интерференции четвертого порядка  $(93 \pm 1)\%$ .

Для теплового поля в интерференции третьего порядка было получено значение видности  $(59 \pm 4)\%$ , а в интерференции четвертого порядка  $(81 \pm 8)\%$ . Раздел 2.6 посвящен поляризационной интерференции третьего порядка. В этом случае излучение двух независимых источников когерентного поля право- и левоциркулярно поляризовано, а интерференционная картина регистрируется тремя детекторами, перед которыми установлены поляризационные фильтры, ориентированные под углами  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ . Если относительные разности фаз, связанные с разностью оптических путей от источника до детектора равны нулю, то значение корреляционной функции определяется ориентацией поляризационных фильтров. Так же, как и в неполяризационном эксперименте, значение максимальной видности для поляризационной интерференции третьего порядка равно 81.8%. В эксперименте было получено значение  $(73 \pm 8)\%$ .

**Глава III «Двухмодовое сжатие при параметрическом рассеянии света»** посвящена изучению неклассических корреляций интенсивностей сигнальной и холостой волны при параметрическом рассеянии света при помощи двух принципиально разных подходов: измерения НКФИ и коэффициента подавления шума. В этой главе предложена и реализована экспериментальная схема широкополосного источника сжатого вакуума с подавлением флуктуаций произвольного параметра Стокса.

В разделе 3.1. (по литературе) подробно описаны способы приготовления и регистрации квадратурно-сжатого света, а также света, сжатого по числу квантов. Раздел 3.2 посвящен другому виду сжатия – двухмодовому, в частности, поляризационному сжатию. В этом пункте вводится понятие коэффициента подавления шума (NRF). Отмечается, что для состояния света на выходе однопроходowego параметрического усилителя с вакуумом на входе независимо от коэффициента параметрического преобразования  $NRF = 0$  для чисел фотонов сигнального и холостого пучков. Это выражение свидетельствует

об абсолютной корреляции интенсивностей сигнального и холостого пучков. Раздел 3.3 состоит из двух подразделов. Пункт 3.3.1 посвящен традиционному методу абсолютной калибровки счетных детекторов, основанному на регистрации совпадений фотоотсчетов при параметрическом рассеянии света. Пункт 3.3.2 посвящен новому абсолютному методу калибровки детекторов, основанному на регистрации двухмодового сжатия. Отличительной особенностью данного метода является его применимость как для счетных, так и для аналоговых детекторов. В разделе 3.4 описана экспериментальная установка для исследования двух статистических характеристик: НКФИ второго порядка  $g^{(2)}$  и коэффициента подавления шума NRF для излучения на выходе однопроходowego параметрического усилителя с вакуумом на входе в зависимости от параметров эксперимента. На представленной установке была реализована калибровка счетного детектора двумя абсолютными способами, рассмотренными в пункте 3.3. Полученные значения квантовой эффективности составили  $\eta_s = (16.6 \pm 0.5)\%$  при измерении методом совпадений и  $\eta_s = (16 \pm 2)\%$  при регистрации двухмодового сжатия. Таким образом, в рамках погрешности полученные значения квантовой эффективности совпали. Представленные в разделе 3.5 результаты (Рис.5) продемонстрировали качественно разное поведение коэффициента подавления шума и НКФИ в зависимости от интенсивности накачки, потерь в оптическом канале и объема детектирования. Увеличение мощности накачки приводит к уменьшению  $g^{(2)}$ , в то время как сжатие не зависит от этого параметра. Обратная ситуация наблюдается с ростом потерь: НКФИ не меняется, а сжатие падает. Увеличение числа регистрируемых мод приводит к уменьшению корреляционной функции и к увеличению сжатия. Поэтому исследование неклассических корреляций сигнального и холостого излучения параметрического рассеяния света

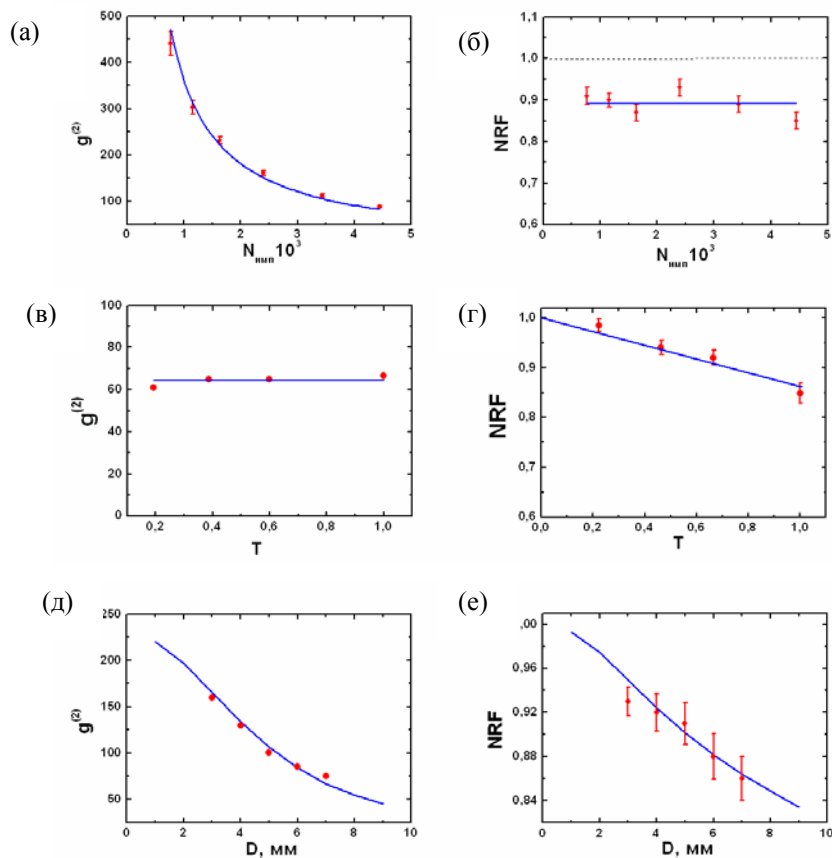


Рис.5. Зависимость  $g^{(2)}$  (а) и  $NRF$  (б) от среднего числа фотоотсчетов за импульс  $N_{имп}$ , при изменении мощности накачки; зависимость  $g^{(2)}$  (в) и  $NRF$  (г) от коэффициента пропускания  $T$ ; зависимость  $g^{(2)}$  (в) и  $NRF$  (г) от размера диафрагмы  $D$

становится более полным при одновременном измерении двух статистических характеристик  $NRF$  и  $g^{(2)}$ .

В разделе 3.7 предложена и реализована экспериментальная схема широкополосного источника сжатого вакуума с подавлением флуктуаций

произвольного параметра Стокса. В этом разделе получены выражения для  $NRF$  второго и третьего параметров Стокса в зависимости от относительной фазы между состояниями, генерируемыми в разных кристаллах. В разделе 3.8 описана экспериментальная реализация схемы, предложенной в пункте 3.7. В разделе 3.9 представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие подавление шумов второго и третьего параметров Стокса в схеме прямого детектирования ниже уровня дробового шума на 50% (Рис.7).

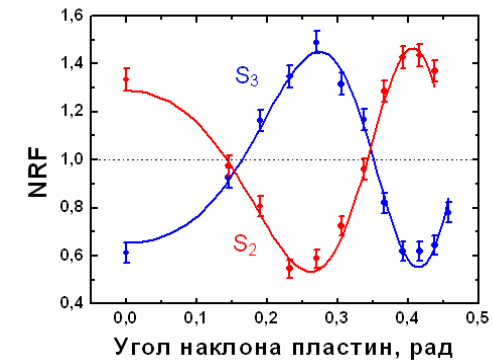


Рис. 7. Зависимость  $NRF$  для второго и третьего параметров Стокса  $S_2, S_3$  от угла наклона пластин, вносящих относительную разность фаз между состояниями, генерируемыми в разных кристаллах.

В **заключении** сформулированы основные результаты.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

1. В работе предложен и апробирован метод измерения нормированных корреляционных функций интенсивности (НКФИ) для импульсных световых

полей. Предложенный метод применен для исследования перехода от спонтанного параметрического рассеяния света к режиму параметрической сверхлюминесценции. Было показано, что в режиме параметрической сверхлюминесценции неклассические корреляции интенсивностей сигнального и холостого пучков при измерении НКФИ не проявляются.

2. Теоретически показано, что максимальная видность интерференции Хэнбери Брауна - Твисса высших порядков по интенсивности для двух независимых классических источников растет с порядком интерференции и реализуется для когерентного поля. Так, видность интерференции третьего и четвертого порядков для источников когерентного поля составляет 81.8% и 94.4%, соответственно, в то время как для источников теплового поля видность достигает значений 60% и 77.8%, соответственно.

3. Экспериментально наблюдаемые максимальные значения видности интерференции третьего и четвертого порядков для источников когерентного поля составили  $(74 \pm 7)\%$  и  $(93 \pm 1)\%$ ; для источников теплового поля -  $(59 \pm 4)\%$  и  $(81 \pm 8)\%$  соответственно. В случае поляризационной интерференции третьего порядка в эксперименте наблюдалась видность  $(73 \pm 8)\%$ .

4. Экспериментально показано качественно разное поведение коэффициента подавления шумов и НКФИ при параметрическом рассеянии света в зависимости от коэффициента параметрического преобразования, потерь в оптическом канале и числа детектируемых мод. С ростом коэффициента параметрического преобразования НКФИ падает, а степень сжатия не меняется;

увеличение потерь приводит к уменьшению степени сжатия, при этом НКФИ не зависит от потерь; увеличение числа регистрируемых мод приводит к росту степени сжатия и уменьшению НКФИ.

5. Реализован метод абсолютной калибровки детекторов, основанный на регистрации двухмодового сжатия при параметрическом рассеянии света. Полученное значение квантовой эффективности оптического канала в рамках погрешности согласуется со значением квантовой эффективности канала, полученным традиционным абсолютным методом регистрации совпадений.

6. В результате прямого детектирования сжатого вакуума впервые получено значительное (до 3 дБ) подавление шума во второй и третьей наблюдаемых Стокса.



#### Публикации в рецензируемых журналах:

1. I.N. Agafonov, M.V. Chekhova, *T.Sh. Iskhakov*, L.-A. Wu, High-visibility intensity interference and ghost imaging with pseudo-thermal light, *Journal of Modern Optics*, **56**, p. 422-431 (2009).
2. *Т.Ш. Исхаков*, Е.Д. Лопаева, А.Н. Пенин, Г.О. Рытиков, М.В. Чехова, «Два способа регистрации неклассических корреляций при параметрическом рассеянии света», *Письма в ЖЭТФ*, **88**, с. 757-761 (2008).
3. I. N. Agafonov, *T. Sh. Iskhakov*, A.N. Penin, M.V. Chekhova, «High-Visibility Multi-Photon Interference of Classical Light», *Phys. Rev. A*, **77**, p. 053801-1 - 053801-8 (2008).
4. И.Н. Агафонов, *Т.Ш. Исхаков*, А.Н. Пенин, М.В. Чехова, «Классический предел видности трехфотонной интерференции», *Письма в ЖЭТФ*, **85**, №8, с. 465-470 (2007).

5. О.А. Иванова, *Т.Ш. Исхаков*, А.Н. Пенин, М.В. Чехова, «Многофотонные корреляции при параметрическом рассеянии света и их измерение в импульсном режиме», Квантовая электроника, **36**, №10, с. 951-956 (2006).
6. И.Н. Агафонов, *Т.Ш. Исхаков*, М.В. Чехова, «Исследование корреляционных функций Глаубера в импульсном режиме», Оптика и спектроскопия, **103**, № 1, с. 121-126 (2007).
7. Агафонов И.Н., *Исхаков Т.Ш.*, Чехова М.В., «Мертвое время фотодетектора и измерение корреляционных функций интенсивности в импульсном режиме», Ученые записки Казанского государственного университета. Серия Физико-математические науки. **148**, книга 1 (2006).

**Публикации в трудах конференций:**

1. I.N. Agafonov, M.V. Chekhova, and *T.Sh. Iskhakov*, «Experimental characterization of multi-photon entanglement with intensity correlation functions», Proceedings of SPIE, **6726**, p. 67262C.1 - 67262C.8 (2007).
2. *T. Sh. Iskhakov*, O. A. Ivanova and M. V. Chekhova, «Multi-photon states and their measurement», Proceedings of SPIE, **5833**, p. 176-185 (2004).