

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

M-912

17-94-122

На правах рукописи

УДК 530.145; 535.14

МУРЗАХМЕТОВ
Болат Кумысбекович

КВАНТОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ АМПЛИТУДЫ
И ФАЗЫ СВЕТА

Специальность: 01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1994

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук А.С. Шумовский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.В. Андреев
(МГУ, Москва)

кандидат физико-математических наук

А.И. Маймистов
(МИФИ, Москва)

Ведущая организация:

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,
г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится " _____ " 199 ____ года на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

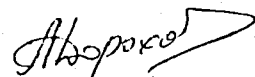
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " 199 ____ года.

Ученый секретарь

Специализированного совета

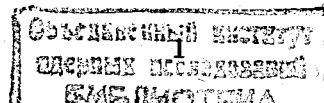
доктор физико-математических наук


А.Е. Дорохов

Актуальность темы.

Прямым следствием квантовой природы электромагнитного поля является наличие неизбежных случайных флуктуаций его амплитуды и фазы. Так как эти флуктуации содержат информацию о свойствах света и о генерирующих его процессах, их изучению было уделено значительное внимание со времен зарождения квантовой механики. Но флуктуации амплитуды и фазы излучения являются также источником шума, ограничивающего точность передачи пучком света информации. Хотя оптические эксперименты часто имеют дело лишь с шумом приборов, некоторые из них достигают пределов измерения, определяемых квантово-статистической природой света. С помощью новой техники перераспределения флуктуаций света в канонически сопряженных наблюдаемых ("сжатия" флуктуаций) исследователи способны в настоящее время проводить эксперименты с точностью, превосходящей предел точности для измерений с использованием лазерного излучения (т.н. предел "дробового шума"). Первое экспериментальное наблюдение сжатого света в лабораториях Белла в 1985 году инициировало плодотворное взаимодействие между дальнейшими экспериментами и развитием теории сжатых состояний. В результате появилось огромное количество публикаций, посвященных различным аспектам сжатых состояний и других неклассических состояний света, возможных источников их генерации, а также применения этих состояний в проблемах передачи оптической информации с подавленным шумом, квантовых неразрушающих измерений, спектроскопии сверхвысокого разрешения и т. д.

Важным направлением исследований неклассического света в последние годы стало изучение его фазовых свойств. Фазовая зависимость квантового шума в сжатом свете дала мотивацию для переосмысления проблемы фазовой переменной в квантовой оптике. Неклассические световые поля описываются в терминах функций квазивероятности, таких как W -функция Вигнера и Q -функция, и фазовая зависимость этих функций распределения дает удобную параметризацию их свойств. Альтернативным путем описания фазы



в квантовой оптике, развитым Пеггом и Барнеттом, является введение фазового распределения на основе эрмитова оператора фазы. После фундаментальных работ Пегга и Барнетта 1989 года по определению эрмитова оператора фазы в этой области появилось значительное количество теоретических публикаций, посвященных исследованию фазовых свойств неклассических состояний света, динамике фазовых переменных в нелинейных оптических процессах, методам измерения фазовой наблюдаемой.

Таким образом, исследование квантовых флуктуаций амплитуды и фазы света в нелинейных оптических процессах является актуальным и важным как с точки зрения теоретического научного познания, так и практического применения.

Цель работы.

Теоретическое исследование флуктуаций амплитуды и фазы света в неклассических состояниях, генерируемых в нелинейных оптических процессах, получение функций распределения амплитудной и фазовой переменных для этих состояний, а также сравнение различных подходов к квантовому описанию фазы поля.

Научная новизна и практическая ценность работы.

Впервые получена общая аналитическая формула для фазовых распределений, основанных как на использовании формализма эрмитова оператора фазы Пегга–Барнетта и фазовых состояний, так и на использовании функций распределения квазивероятности. С помощью этой формулы исследованы фазовые свойства различных неклассических состояний света и дан сравнительный анализ этих двух подходов к квантовому описанию фазы.

Дано обобщение метода описания фазовых свойств одной моды поля на случай двух мод. Исследованы статистика числа фотонов и фазовые свойства двухмодовых сжатых фоковских состояний.

Для процесса резонансной флуоресценции впервые исследованы условия максимального сжатия квантовых флуктуаций света в схеме смешивания двух крайних мод триплета в зависимости от добротности резонатора, частотной расстройки поля накачки и атомных переходов, температуры полевого термостата.

Впервые проведена оценка чувствительности резонансной антенны гравитационных волн, приготовленной в сжатом фоковском состоянии.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Для общего вида состояний поля с частично определенной фазой установлена взаимосвязь между фазовым распределением Пегга–Барнетта и фазовым распределением Вигнера. Последнее можно получить посредством “усреднения” распределения Пегга–Барнетта с помощью коэффициентов, для которых получена простая аналитическая формула.
2. В случае смещенных фоковских состояний показано, что фазовое распределение Пегга–Барнетта и фазовое распределение, связанное с W -функцией Вигнера близки друг к другу, тогда как фазовое распределение, связанное с Q -функцией, теряет часть фазовой информации. Показано также, что распределение числа фотонов и фазовое распределение Пегга–Барнетта для этих состояний имеют похожую структуру (по количеству пиков).
3. Показано, что в случае смещенных хаотических состояний все фазовые распределения качественно похожи и в пределе большого среднего числа фотонов переходят в равномерное распределение.
4. Для сжатых фоковских состояний показано, что фазовое распределение Вигнера, не зависит от числа фотонов в начальном (до сжатия) фоковском состоянии, и следовательно, является фазовым распределением и для сжатого хаотического состояния. Фазовое распределение Пегга–Барнетта и фазовое распределение, полученное из Q -функции, в пределе большого числа фотонов сходятся к распределению Вигнера.
5. В случае сжатых хаотических состояний показано, что при увеличении теплового возбуждения (среднего числа фотонов в начальном хаотическом состоянии) фазовое распределение Пегга–Барнетта и распределения, полученные интегрированием по радиальной переменной Q -функции и P -функции, сходятся к фазовому распределению Вигнера.

6. Дано определение двухмодовых сжатых фоковских состояний. Показано, что распределение числа фотонов и фазовое распределение Пегга-Барнетта для таких состояний имеют похожую структуру (по числу пиков). Фазовое распределение Пегга-Барнетта и фазовое распределение Вигнера близки друг к другу, тогда как распределение, связанное с Q -функцией, теряет часть фазовой информации. Получены аналитические выражения для Q -функции и W -функции Вигнера для рассматриваемых состояний. Их зависимость лишь от суммы фаз двух мод (а не фаз каждой из мод в отдельности) указывает на сильную корреляцию между модами.
7. Найдены условия получения сильного сжатия света в смеси двух мод с частотами, близкими к частотам крайних компонент триплета резонансной флуоресценции.
8. Получены оценки чувствительности детектора гравитационных волн (затухающего гармонического осциллятора), приготовленного в начальный момент времени в сжатом фоковском состоянии, в зависимости от степени сжатия и числа квантов осциллятора.

Апробация работы.

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах в ЛТФ ОИЯИ и ИЯФ АН Республики Казахстан, на Международных семинарах "Проблемы квантовой оптики" (Дубна, 1991, 1993), IV Международном семинаре по квантовой оптике (Минск, 1992), Фридмановском международном семинаре по гравитации и космологии (Санкт-Петербург, 1993), III Международном семинаре "Сжатые состояния и соотношения неопределенности" (Морилэнд, США, 1993) и на Зимней школе по квантовой оптике (Триест, Италия, 1994).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем работы.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Она содержит 97 страниц машинописного текста, 20 рисунков и библиографический список из 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор литературы, связанной с рассматриваемыми в диссертации проблемами. Изложена цель исследования с обоснованием ее актуальности. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе диссертации приведен обзор свойств сжатых состояний электромагнитного поля, даны определения и рассмотрены свойства функций распределения квазивероятности, полезных при изучении статистических и фазовых свойств неклассических состояний света. Глава состоит из трех параграфов.

В § 1.1 дано определение квадратурно-сжатых и амплитудно-сжатых состояний света, на примере двухфотонных когерентных состояний обсуждаются свойства идеальных сжатых состояний, рассматриваются двухмодовые сжатые состояния.

В § 1.2 рассмотрена статистика числа фотонов в квадратурно-сжатом состоянии, дана интерпретация осцилляций в распределении числа фотонов в терминах интерференции в фазовом пространстве.

В § 1.3 даны определения функций распределения квазивероятности: P -функции Глаубера-Сударшана, Q -функции и W -функции Вигнера. Обсуждаются их преимущества и недостатки при описании неклассических состояний света. Дано обобщение этих функций на двухмодовый случай.

Вторая глава посвящена исследованию статистических и фазовых свойств фоковских состояний света, подвергнутых когерентному смещению и сжатию. Такие состояния являются существенно неклассическими. Изучены также свойства смещенных хаотических и сжатых хаотических состояний. Глава состоит из четырех параграфов.

В § 2.1 дан краткий исторический очерк о различных попытках определения эрмитова оператора фазы.

В § 2.2 показывается, как на основе эрмитова оператора фазы, определенного Пеггом и Барнеттом (PB), можно ввести фазовое распределение вероятности. Приведен также альтернативный подход к квантовому описанию фазовой переменной с помощью функций распределения квазивероятности. С помощью интегрирования этих функций по радиальной переменной получены точные аналитические выражения для фазовых распределений квазивероятности, связанных с Q -функцией и W -функцией Вигнера. Показано, что все три фазовые распределения можно выразить общей аналитической формулой:

$$P^{(S)}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n>k} b_n b_k \cos[(n-k)(\theta - \varphi)] G^{(S)}(n, k) \right\},$$

где b_n — коэффициенты разложения состояния поля по базису фоковских состояний, а матрицы $G^{(S)}(n, k)$ соответствуют различным типам распределений ($S = PB, Q$ или W).

В § 2.3 исследованы статистические и фазовые свойства фоковских и хаотических состояний, подвергнутых когерентному смещению. Показано, что распределение числа частиц и фазовое распределение Пегга-Барнетта в смещенном фоковском состоянии имеют похожую $(N+1)$ -пиковую структуру, где N — число фотонов в фоковском состоянии до когерентного смещения. Проведено сравнение различных фазовых распределений. Показано, что в случае смещенных фоковских состояний фазовое распределение Пегга-Барнетта и фазовое распределение Вигнера близки друг к другу, тогда как фазовое распределение, полученное из Q -функции, теряет часть фазовой информации. Для смещенных хаотических состояний существует хорошо определенная P -функция Глаубера-Сударшана. С помощью интегрирования по радиальной переменной получено фазовое распределение квазивероятности, связанное с P -функцией, которое является наиболее резким из рассматриваемых распределений. Все фазовые распределения качественно похожи и в пределе большого среднего числа фотонов переходят в равномерное распределение.

В § 2.4 проведено исследование фоковских и хаотических состояний, подвергнутых сжатию. Для сжатых фоковских состояний показано, что фазовое распределение Вигнера не зависит от числа

фотонов в начальном (до сжатия) фоковском состоянии, и следовательно, является фазовым распределением и для сжатого хаотического состояния. Фазовое распределение Пегга-Барнетта и фазовое распределение, полученное из Q -функции, в пределе большого числа фотонов сходятся к распределению Вигнера. В случае сжатых хаотических состояний получены выражения для W -функции Вигнера, Q -функции и P -функции Глаубера-Сударшана. Показано, что при увеличении теплового возбуждения (среднего числа фотонов в начальном хаотическом состоянии) фазовое распределение Пегга-Барнетта и распределения, полученные интегрированием по радиальной переменной Q -функции и P -функции, сходятся к фазовому распределению Вигнера.

В третьей главе определяются двухмодовые сжатые фоковские состояния, исследуются их статистические и фазовые свойства.

В § 3.1 дано определение двухмодовых сжатых фоковских состояний как обобщение двухмодового сжатого вакуума. Приведен пример процесса, в котором возможна генерация таких состояний.

В § 3.2 исследована статистика числа фотонов в двухмодовом сжатом фоковском состоянии. Показано, что распределение числа фотонов в этом состоянии имеет $(N+1)$ -пиковую структуру для ненулевого значения разности числа фотонов q между модами (здесь N — число фотонов в моде a и $(N+q)$ — число фотонов в моде b до сжатия поля). Получены аналитические выражения для Q -функции и W -функции Вигнера для рассматриваемого состояния поля.

В § 3.3 изучаются фазовые свойства двухмодовых сжатых фоковских состояний. Показано, что фазовое распределение Пегга-Барнетта для таких состояний имеет $(N+1)$ -пиковую структуру для ненулевого значения разности числа фотонов между модами. Получены точные аналитические формулы для фазовых распределений, основанные на различных фазовых подходах. Показано, что фазовое распределение Пегга-Барнетта и фазовое распределение Вигнера близки друг к другу, тогда как распределение, полученное из Q -функции, теряет часть фазовой информации.

Четвертая глава посвящена проблеме генерации квадратурно-сжатых состояний в резонансной флуоресценции и оценке чувстви-

тельности резонансной гравитационной антенны, приготовленной в сжатом фоковском состоянии.

В § 4.1 исследованы условия возникновения сильного сжатия в смеси двух мод с частотами, близкими к частотам крайних компонент спектра резонансной флуоресценции. Получено выражение для функции (фактора сжатия), характеризующей степень сжатия поля, в зависимости от параметров системы: добротности резонатора, расстройки между частотой поля накачки и частотой перехода атомов в возбужденное состояние, температуры полевого термостата. Проведено исследование фактора сжатия в пределе большого числа атомов. Показано, что в случае, когда можно пренебречь влиянием полевого термостата, теоретически возможно достижение предельного сжатия. Получены условия, при которых можно пренебречь влиянием термостата.

В § 4.2 рассмотрена проблема детектирования импульса гравитационной волны с помощью резонансной антенны, моделью для которой выбран затухающий гармонический осциллятор. Получены оценки чувствительности данного детектора, приготовленного в начальный момент времени в сжатом фоковском состоянии, в зависимости от степени сжатия и числа квантов осциллятора.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации, которые и выносятся на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. R. Tanaś, B.K. Murzakhmetov, Ts. Gantsog, A.V. Chizhov. Phase properties of displaced number states. *Quantum Optics*, 1992, v. 4, p. 1-7.
2. A.V. Chizhov, Ts. Gantsog, B.K. Murzakhmetov. Phase distributions of squeezed number states and squeezed thermal states. *Quantum Optics*, 1993, v. 5, p. 85-93.
3. Ц. Ганцог, Б.К. Мурзахметов, Р. Танась, А.В. Чижов. Фазовые распределения для смещенного фоковского и смещенного хаотического состояний. Препринт ОИЯИ Р17-92-289, Дубна, 1992. *J. Quant. Nonlin. Phenom.*, in press.

4. A.V. Chizhov, B.K. Murzakhmetov. Photon statistics and phase properties of two-mode squeezed number states. *Phys. Lett. A*, 1993, v. 176, p. 33-40.
5. Б.К. Мурзахметов, А.С. Шумовский. Оптимальный режим генерации сжатого состояния в резонансной флуоресценции. *Оптика и спектроскопия*, 1991, т. 71, вып. 3, с. 482-484.
6. Б.К. Мурзахметов, А.В. Чижов. Сжатые фоковские состояния и детектирование гравитационных волн. *Оптика и спектроскопия*, 1993, т. 75, вып. 5, с. 1035-1039.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 апреля 1994 года.