

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

РГБ ОД

12 СЕН 2007

На правах рукописи

Волоховский Всеволод Васильевич

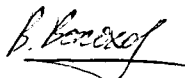
**ФОРМИРОВАНИЕ НЕКЛАССИЧЕСКОГО СВЕТА
В ДИССИПАТИВНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ НЕЛИНЕЙНО –
ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2000



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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Чиркин А.С.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Ораевский А.Н.

доктор физико-математических наук, Вятчанин С.П.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится "12" октября 2000 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 053.05.82 в МГУ им. М.В.Ломоносова по адресу: 119899 Москва, Воробьевы Горы, ул. Академика Хохлова, д.1, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А.Ахманова

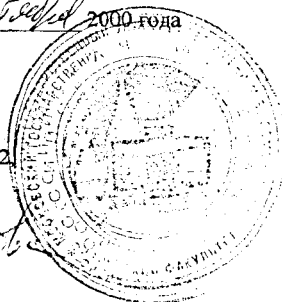
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан "8" сентября 2000 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.053.05.82

доцент

Ильинова
ВЗ43.7.03



Т.М.Ильинова

Актуальность исследования

В последнее время значительный интерес вызывают неклассические состояния света. Неклассический свет представляет собой излучение, в котором уровень квантовых флуктуаций некоторых его параметров ниже так называемого стандартного квантового предела. К настоящему времени экспериментально получен свет с уменьшенными флуктуациями числа фотонов (свет с субпуассоновской статистикой фотонов), излучение с подавленными флуктуациями одной из квадратурных компонент, так называемый квадратурно - сжатый свет. Наблюдаемые свойства такого света не могут быть описаны классически. Интерес к неклассическому свету в настоящее время стимулируется активным развитием таких разделов квантовой оптики, как квантовая криптография, квантовая телепортация и квантовые вычисления. Так квадратурно-сжатый свет был применен в экспериментах по квантовой телепортации, что позволило осуществить передачу информации с высоким уровнем надежности, недостижимым в классическом случае. Излучение с низким уровнем шума необходимо также для осуществления высокоточных оптико - физических измерений.

К настоящему времени разработан ряд методов получения поляризационно - сжатого света. Свет данного типа характеризуется подавленными флуктуациями параметров, определяющих поляризационное состояние излучения. Исследована возможность генерации поляризационно - сжатого света в средах с квадратичной и кубической оптическими нелинейностями. Свойства неклассического света существенным образом меняются при прохождении через оптические элементы. При этом наиболее существенное воздействие могут оказывать различные источники потерь, в первую очередь поглощение. В связи с этим актуальной проблемой является изучение влияния поглощения на подавление квантовых флуктуаций поляризации. В выполненных работах, посвященных поляризационно - сжатому свету, исследована лишь возможность формирования такого света, реальные свойства нелинейных сред и возможные сопутствующие нелинейно - оптические процессы при этом не принимались во внимание.

В настоящее время в нелинейной оптике развивается новое направление, связанное с одновременной реализацией в кристаллах с регулярной доменной структурой двух последовательных квазисинхронных процессов с кратными частотами. Разработана классическая теория последовательных процессов. Вместе с тем особый интерес могут представлять квантовые свойства волн, участвующих в этих взаимодействиях, которые еще не изучены.

Перечисленные вопросы явились предметом исследования, изложенного в диссертационной работе.

Цель диссертационной работы

Цель работы состояла в квантовом анализе двухмодового взаимодействия световых волн в средах с квадратичной и кубичной оптическими нелинейностями с учетом реальных свойств сред и частичной когерентности основного излучения. Главным предметом исследований было:

1. анализ формирования квадратурно - сжатых и поляризационно - сжатых состояний света в кубично - нелинейных средах в условиях параметрического энергообмена между волнами;
2. разработка простого метода учета влияния диссипативных эффектов при квантовом описании многомодовых взаимодействий и его применение для исследования влияния линейного поглощения излучения и тепловых шумов на процесс генерации неклассического света;
3. анализ квантовых свойств излучения, формируемого при параметрическом усилении во встречных последовательных взаимодействиях волн с кратными частотами.

Научная новизна

К оригинальным результатам работы относятся установление возможности генерации поляризационно - сжатого света в изотропных гиротропных средах и анализ влияния параметрического обмена энергией между взаимодействующими волнами и поглощения излучения на формирование данного типа неклассического света. Впервые проведено квантовое рассмотрение нелинейно - оптических процессов при встречном параметрическом усилении волн в последовательных взаимодействиях волн с кратными частотами.

Научная и практическая ценность работы

Результаты работы, связанные с учетом диссипации и частичной когерентности излучения, позволяют корректно оценить эффективность генерации поляризационно - сжатого света в реальных экспериментальных условиях.

Развитый в работе метод учета тепловых шумов среды позволяет рассчитывать статистические моменты квантовых полей при многочастотных взаимодействиях.

Результаты работы показывают возможность формирования при встречном параметрическом взаимодействии волн с кратными частотами неклассического света на частотах ниже и выше частоты накачки с частичной взаимной корреляцией фотонов. При этом ре-

ализуемое параметрическое усиление при низкочастотной накачке позволяет в три раза снизить значение частоты накачки для генерации квадратурно - сжатого света.

Положения, выносимые на защиту

1. При взаимодействии двух мод когерентного излучения одинаковой частоты в изотропных гиротропных кубично - нелинейных средах возможно формирование поляризационно - сжатого света.
2. Параметрические взаимодействия в анизотропных кубично - нелинейных средах могут приводить к более глубокому подавлению флуктуаций стоковых параметров и квадратурных компонент, чем в отсутствие энергообмена, и обуславливают изменение статистики фотонов поляризационных мод.
3. Поглощение излучения в нелинейной среде приводит к наличию оптимальной длины взаимодействия, на которой происходит максимальное подавление флуктуаций стоковых параметров и квадратурных компонент. На длинах взаимодействия, превышающих оптимальную, уровень флуктуаций указанных параметров возрастает вследствие роста некогерентной шумовой добавки.
4. Частичная когерентность основного излучения приводит к уменьшению эффективности подавления квантовых флуктуаций в выходном основном излучении в процессе генерации второй оптической гармоники смещением волн. При этом происходит также снижение уровня тепловых флуктуаций основного излучения.
5. В последовательных процессах встречного параметрического взаимодействия с кратными частотами квадратурно - сжатый свет формируется как на низкой, так и на высокой частоте по отношению к частоте накачки. При этом фотоны усиливаемых полей частично коррелированы.

Апробация результатов работы

Материалы диссертационной работы были доложены на

- VI и VII Международных семинарах по квантовой оптике (Минск, 1996 и 1998) [8, 9],
- Конференции молодых ученых в рамках юбилейных мероприятий, посвященных 70-ти летию Р.В. Хохлова (Москва, 1996) [10],
- V International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, ICSSUR'97 (Balatonfured, Hungary, 1997) [11],
- XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO'98 (Moscow,

Russia, 1998) [12],

- IV International Conference on Quantum Communications, Measurement and Computing, QCM'98 (Evanston, USA, 1998) [13],

- VI International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, ICSSUR'99 (Naples, Italy, 1999) [14]

- International Conference on Quantum Optics and VIII Seminar on Quantum Optics, ICQO'200 (Minsk, Belarus, 2000) [15]

и отражены в публикациях в журналах Квантовая электроника [5], Оптика и спектроскопия [3,6], Известия РАН [2], Laser Physics [7], Journal of Russian Laser Research [1] и Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials [4].

Список из 15 публикаций по материалам диссертации приведен в конце настоящего автореферата.

Личный вклад автора

Автором выполнены все расчеты по анализу квантовых состояний излучения в процессах формирования неклассического света в средах с квадратичной и кубичной оптическими нелинейностями и интерпретация полученных результатов.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа содержит 131 страницу текста, включая 25 рисунков, и список цитированной литературы из 113 наименований. Работа состоит из Введения, обзорной главы, 4-х оригинальных глав, Заключения и Списка литературы.

Краткое содержание работы

Во Введении сформулированы актуальность темы и цель диссертационной работы, ее научная новизна и практическая ценность. Приведены основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

В главе 1 дан обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных проблемам генерации неклассического света, а также использованию его квантовых свойств в различных оптико-физических измерениях.

Рассмотрены как традиционные нелинейно - оптические методы, применяемые в настоящее время для получения сжатых состояний, такие как параметрические процессы, генерация оптических гармоник, резонансная флуоресценция, так и недавно предложен-

ный метод формирования квадратурно сжатых состояний, основанный на квазисинхронном взаимодействии волн с кратными частотами в периодически - неоднородных средах.

Обсуждаются вопросы применения света в сжатом состоянии в различных областях квантовой оптики. Показано, что свет в неклассическом состоянии находит свое применение во многих перспективных разделах оптики, включая высокоточную интерферометрию и регистрацию малых фазовых изменений, передачу изображений, квантовую томографию и телепортацию.

Специальный раздел посвящен описанию света с неклассическим состоянием поляризации. Здесь изложен метод квантового описания состояния поляризации излучения. Дано определение понятия поляризационно - сжатого света как излучения, для которого флуктуации одного из параметров Стокса меньше уровня, соответствующего когерентному состоянию излучения. Описаны условия, при которых возможно формирование неклассического света указанного типа, а также рассмотрены существующие нелинейно-оптические методы, формирования поляризационно-сжатого света. Приведена схема эксперимента для практического измерения квантовых флуктуаций при поляризационном сжатии.

Глава 2 посвящена изучению процессов формирования неклассического поляризационного состояния излучения в кубично - нелинейных недиссипативных средах. Прежде всего показана возможность формирования поляризационно - сжатого света в изотропных гиротропных средах. Рассмотрено влияние параметрических процессов обмена энергией между взаимодействующими модами в анизотропных средах. Дано обоснование правомерности применения метода заданного числа фотонов при анализе параметрических процессов путем сравнения найденного точного решения классической задачи о двухволновом взаимодействии в исследуемых средах с решением в приближении заданной интенсивности, квантовым аналогом которого является приближение заданного числа фотонов. В главе также сделаны количественные оценки параметров и определены оптимальные условия подавления флуктуаций.

В разделе 2.1 рассмотрены процессы подавления квантовых флуктуаций поляризации при взаимодействии двух мод когерентного излучения с одинаковыми частотами в изотропной гиротропной кубично - нелинейной среде. Нелинейное взаимодействие волн описывается гамма-тоннавом

$$H_{int} = \hbar(2\rho_0(a_1^\dagger a_1 - a_2^\dagger a_2) + \beta_1(a_1^\dagger)^2 a_1^2 + \beta_2(a_2^\dagger)^2 a_2^2 + 2\beta a_1^\dagger a_1 a_2^\dagger a_2), \quad (1)$$

где a_j^\dagger (a_j) - операторы рождения (уничтожения) фотонов нормальных мод среды, индекс "1" ("2") относится к моде с правой (левой) круговой поляризацией; $\beta, \beta_{1,2}$ - константы

нелинейной связи волн, β отвечает за кросс-взаимодействие, а $\beta_{1,2}$ — за самовоздействие волн.

В силу изотропии линейных свойств среды процессы параметрического обмена энергией отсутствуют, что на квантовом языке выражается в сохранении числа фотонов каждой моды излучения равным значениям на входе в среду. Последнее обстоятельство дает возможность нахождения точного аналитического решения для уравнений эволюции операторов поля, соответствующих гамильтониану (1).

Найдены средние значения и дисперсии параметров Стокса, определяющие поляризационное сжатие. Нормированные дисперсии описываются выражением

$$v_{3,1} = 1 \mp \delta^2(1 + \varepsilon^2) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{1 - \varepsilon}{\delta(1 + \varepsilon^2)} \right)^2}, \mp 1 \right] \quad (2)$$

где δ — связанный с самовоздействием нелинейный фазовый набег, $\varepsilon = (\beta_1 - \beta)/(\beta_2 - \beta)$ — соотношение нелинейных коэффициентов.

Показано, что в отсутствие пространственной дисперсии ($\varepsilon = 1$) подавление флуктуаций не происходит. В случае, когда нелинейные фазовые набег, приобретаемые модами при распространении в среде, имеют противоположные знаки ($\varepsilon = -1$), подавление флуктуаций происходит наиболее эффективно.

В разделе 2.2 впервые изучено влияние параметрического обмена между взаимодействующими модами в анизотропных кубично - нелинейных средах на формирование неклассического света в вырожденном четырехчастотном смещении. Анализ проведен в приближении заданного числа фотонов. Использование такого подхода позволило найти зависимости операторов поля от длины взаимодействия мод

$$\begin{cases} a_1(z) = e^{i(\gamma_1 \hat{n}_1 + \gamma_2 \hat{n}_2)z} [a_1 + iG(\Delta)e^{i\Delta z/2} a_1^+ a_2^+], \\ a_2(z) = e^{i(\gamma_2 \hat{n}_2 + \gamma_1 \hat{n}_1)z} [a_2 + iG(\Delta)e^{-i\Delta z/2} a_2^+ a_1^+], \end{cases} \quad (3)$$

где $G(\Delta) = 0.5\gamma \text{sinc}(\Delta z/2)$, γ_j, γ — коэффициенты нелинейной связи волн, $\Delta = 2(k_2 - k_1)$ — расстройка волновых векторов. Первые слагаемые в (3) обусловлены эффектами самовоздействия и кросс-взаимодействия, а вторые слагаемые представляют собой зависящую от фазы и волновой расстройки добавку, обусловленную наличием параметрического энергообмена.

Определены статистические характеристики квадратурных компонент излучения и стоковых параметров. Показано, что параметрический энергообмен между взаимодействующими поляризационными модами сказывается лишь на количественных характе-

ристикмах мощности шума. Подавление флуктуаций квадратур и параметров Стокса при этом, по-прежнему, остается принципиально возможным.

Установлено, что фазовые условия оптимального подавления флуктуаций зависят от величины волновой расстройки. Проведен анализ эффективности подавления флуктуаций в зависимости от эффективности энергообмена между модами. Показано, что с ростом нормированной волновой расстройки η ($\eta = \Delta L_{nl}$ - разность фаз, приобретаемая модами при длине взаимодействия, равной нелинейной L_{nl} , за счет разности волновых векторов Δ), влияние процессов обмена энергией на формирование поляризационно - сжатого света снижается, а при $\eta \gg 1$ вкладом параметрических процессов можно пренебречь. Однако, в случае $\eta \approx 1$ выбором величины волновой расстройки между поляризационными модами можно достичь более глубокого подавления флуктуаций квадратурных компонент и стоковых параметров, чем в отсутствии параметрических взаимодействий.

Установлено также, что обмен энергией между поляризационными модами обуславливает изменение статистики излучения мод и возможность получения излучения с субпуассоновской статистикой.

Раздел 2.3 содержит анализ применимости метода заданного числа фотонов при описании формирования неклассического света в процессах вырожденного четырехволнового смешения. Найдено точное решение задачи о взаимодействии двух мод когерентного излучения в среде с нелинейностью третьего порядка в классической постановке. Проведено сравнение его с решением задачи в приближении заданной интенсивности, квантовым аналогом которого служит приближение заданного числа фотонов. На основании сравнения найдена установлено, что приближение заданного числа фотонов корректно описывает рассмотренный процесс на длинах взаимодействия, не превышающих характерную нелинейную длину L_{nl} .

В главе также приведены количественные оценки величин, характеризующих эффективность подавления флуктуаций, для различных нелинейных сред и приведены примеры сред, в которых параметрические процессы оказывают существенное влияние на генерацию поляризационно-сжатого света.

Глава 3 посвящена изучению влияния линейного поглощения излучения в кубично - нелинейных анизотропных средах на формирование неклассического света. При анализе в соответствии с квантовой теорией диссипации нелинейная среда рассматривалась как тепловой резервуар, характеризуемый независимой от частоты константой поглощения δ и числом шумовых квантов \bar{N} , которые, в свою очередь, предполагались δ - коррелированными.

В разделе 3.1 рассмотрены методы описания и исследования диссипативных эффек-

тов, применяемые в настоящее время в квантовой оптике, с точки зрения эффективности их использования для анализа многомодовых взаимодействий.

В разделе 3.2 рассмотрена задача о формировании поляризационно - сжатого света в анизотропной среде при наличии поглощения. Для проведения анализа использован формализм уравнений Гайзенберга-Ланжевена

$$\begin{cases} \frac{\partial a_1}{\partial t} = -\frac{\delta_1}{2} a_1 + i(\tilde{\gamma}_1 a_1^\dagger a_1 + \tilde{\gamma}_2 a_2^\dagger a_2) a_1 - \sqrt{\delta_1} b_1, \\ \frac{\partial a_2}{\partial t} = -\frac{\delta_2}{2} a_2 + i(\tilde{\gamma}_2 a_2^\dagger a_2 + \tilde{\gamma}_1 a_1^\dagger a_1) a_2 - \sqrt{\delta_2} b_2, \end{cases} \quad (4)$$

где δ_j - коэффициенты поглощения мод, $b_j(b_j^\dagger)$ - операторы уничтожения (рождения) квантов резервуара, обладающие свойствами:

$$\begin{aligned} [b_j(t'), b_k^\dagger(t)] &= \delta(t' - t)\delta_{jk}, & \langle b_j \rangle &= \langle b_j^\dagger \rangle = 0, \\ [b_j^\dagger(t') b_k(t)] &= \bar{N}_j \delta_{jk} \delta(t' - t), & \langle b_j(t') b_k^\dagger(t) \rangle &= (\bar{N}_j + 1) \delta_{jk} \delta(t' - t). \end{aligned} \quad (5)$$

Определение статистических характеристик квадратурных компонент полей и операторов Стокса проведено путем поэтапного усреднения уравнений (4) по шумовым (некогерентным) флуктуациям, затем по когерентным флуктуациям. Анализ проведен в приближении заданного числа фотонов, что в данном случае соответствует слабому поглощению. Применение данного приближения позволило преобразовать исходные уравнения Ланжевена (4) к более простому виду, допускающему получение формального решения в квадратурах.

Найдены выражения для средних значений и дисперсий квадратур и параметров Стокса. Также исследована зависимость данных величин от коэффициентов поглощения мод и соотношения начальных интенсивностей. Показано, что при взаимодействии мод в диссипативной среде наряду с перераспределением когерентных флуктуаций происходит дополнительное зашумление мод за счет взаимодействия с резервуаром. Распространение мод в среде сопровождается подавлением флуктуации когерентной составляющей и ростом некогерентных флуктуаций. Установлено, что наличие поглощения и тепловых шумов снижает эффективность формирования неклассического света и обуславливает наличие оптимальной длины взаимодействия L_{opt} , подавление флуктуаций параметров Стокса и квадратурных компонент на которой максимально.

Установлено, что на длинах, превышающих оптимальную, уровень флуктуаций рассматриваемых параметров растет по мере увеличения пройденного расстояния. Значение оптимальной длины L_{opt} определяется параметрами падающего излучения и нелинейной среды, а также интенсивностью диссипации. Обнаружено, что на длине взаимодействия, значительно превосходящей оптимальную $L \gg L_{opt}$, уровень флуктуаций квадратур и

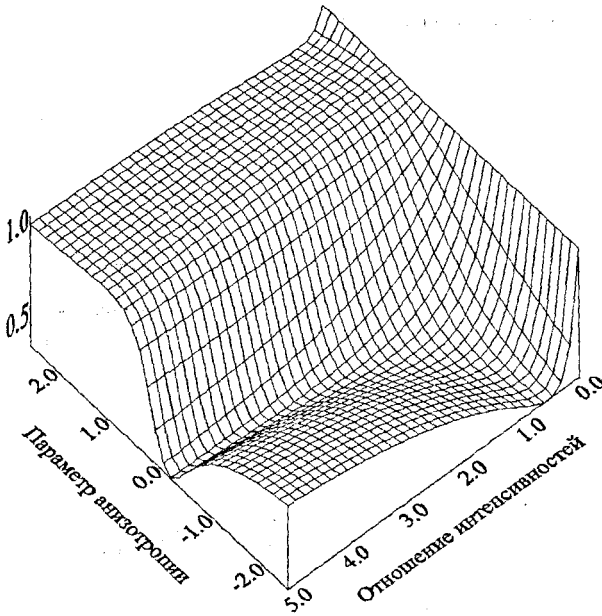


Рис. 1: Зависимость дисперсии v_{S_2} стокового параметра S_2 от параметра анизотропии нелинейности ϵ и соотношения начальных интенсивностей когерентных мод при оптимальном выборе разности фаз для случая фазового набегания на длине диссипации $M_0 = 10$ и $\xi = 0.3$.

стоковых параметров определяется уровнем шума резервуаров и перестает зависеть от характеристик падающего излучения и нелинейной среды. При этом значения дисперсий квадратур и стоковых параметров на выходе из среды совпадают таковыми для случая полностью некогерентного излучения с числом фотонов, равным числу шумовых квантов резервуара.

В разделе 3.3 предложен метод усреднения квантовых уравнений Ланжевена, позволяющий провести анализ влияния диссипативных эффектов на формирование неклассического света в многомодовых процессах, идущих с преобразованием частот взаимодействующих волн.

Показано, что для определения дисперсий параметров Стокса, необходим расчет кор-

реляций второй и четвертой степени между операторами, описывающими излучение, и операторами теплового резервуара:

$$\begin{aligned} \frac{d\langle a_j^\dagger a_k \rangle}{dt} &= -\frac{\delta_j + \delta_k}{2} \langle a_j^\dagger a_k \rangle - \frac{i}{\hbar} \langle [a_j^\dagger a_k, H_{int}] \rangle - \sqrt{\delta_j} \langle b_j^\dagger a_k \rangle - \sqrt{\delta_k} \langle a_j^\dagger b_k \rangle, \\ \frac{d\langle (a_j^\dagger a_k)^2 \rangle}{dt} &= -\frac{\delta_j + \delta_k}{2} \langle (a_j^\dagger a_k)^2 \rangle - \frac{i}{\hbar} \langle [(a_j^\dagger a_k)^2, H_{int}] \rangle \\ &\quad - \sqrt{\delta_j} (\langle b_j^\dagger a_k a_j^\dagger a_k \rangle + \langle a_j^\dagger a_k b_j^\dagger a_k \rangle) - \sqrt{\delta_k} (\langle a_j^\dagger b_k a_j^\dagger a_k \rangle + \langle a_j^\dagger a_k a_j^\dagger b_k \rangle). \end{aligned} \quad (6)$$

Предложенный в разделе метод основан на разложении операторов поля на коррелирующую и не коррелирующую с операторами резервуара составляющие:

$$a_j(t) = a_{jnc}(t - \Delta t) + a_{jcor}(t). \quad (7)$$

Здесь временной интервал Δt больше времени корреляции шума и меньше времени существенного изменения операторов поля.

Коррелирующая часть a_{jcor} определена интегрированием уравнений Ланжевена для операторов поля по временному интервалу $[t, t - \Delta t]$. Соответствующие значения парных корреляций могут быть записаны в виде:

$$\langle b_j^\dagger a_k \rangle = -\sqrt{\delta} \frac{\bar{N}_k}{2} \delta_{kj}, \quad \langle a_j b_k^\dagger \rangle = -\sqrt{\delta_j} \frac{\bar{N}_j + 1}{2} \delta_{jk} \quad (8)$$

Корреляторы высших порядков вычислены в предположении гауссовой статистики тепловых флуктуаций посредством представления через попарные произведения.

Показано, что указанный метод позволяет рассчитать все необходимые корреляторы для определения статистических характеристик операторов поля. При помощи данного подхода может быть исследовано влияние диссипации излучения и тепловых шумов на процессы формирования неклассических состояний. Метод наиболее эффективен для рассмотрения формирования неклассического света в процессах, идущих с преобразованием частот, так как позволяет определить статистические характеристики операторов поля без дополнительных предположений относительно эффективности частотного преобразования.

Описанный выше подход был применен для анализа эффектов диссипации в пространственно - периодических средах. Особенность формирования поляризационно - скачкового света в средах данного типа заключается в наличии линейного энергообмена между модами. Необходимо отметить, что учет некогерентных шумов в кубично - нелинейных средах, представленный в главе 3 с помощью решения уравнений (4), может быть также реализован изложенным методом.

В главе 4 представлены результаты теоретического анализа эволюции квантовых шумов в процессе генерации второй гармоники путем смешения волн ортогональных линейных поляризаций (второй тип взаимодействия) с учетом наличия поглощения излучения в среде и тепловых шумов, а также рассмотрено влияние частичной когерентности накачки на эффективность генерации поляризационно сжатого света в указанном процессе.

В разделе 4.1 рассмотрена задача о формировании поляризационно - сжатого света на основной частоте в процессе генерации второй гармоники по второму типу взаимодействия с учетом эффектов диссипации. Процесс описывается уравнениями

$$\begin{cases} \frac{d\hat{A}_{1,2}}{dt} = -\frac{\epsilon_{1,2}}{2}\hat{A}_{1,2} \mp \beta\hat{A}_{1,2}^+\hat{A}_3 - \sqrt{\delta_{1,2}}b_{1,2}(t), \\ \frac{d\hat{A}_3}{dt} = -\frac{\epsilon_{1,2}}{2}\hat{A}_3 + \frac{1}{2}\beta(\hat{A}_1^2 - \hat{A}_2^2) - \sqrt{\delta_3}b_3(t), \end{cases} \quad (9)$$

где $\hat{A}_{1,2}^+(\hat{A}_{1,2})$ – операторы рождения (уничтожения) фотонов на основной частоте, $\hat{A}_3^+(\hat{A}_3)$ – на частоте второй гармоники.

Рассмотрена линеаризованная модель анализа подавления квантовых флуктуаций, согласно которой квантовые операторы \hat{A}_j представлены в виде

$$\hat{A}_j = A_j + a_j,$$

где A_j – c -числа, являющиеся решениями классических уравнений генерации второй гармоники, a_j – операторы, описывающие квантовые флуктуации, где $\langle a_j \rangle = 0$. Такой подход позволяет получить из системы (9) две независимые системы уравнений для флуктуаций квадратурных компонент полей, через которые в рамках линейной модели выражаются флуктуации параметров Стокса.

Корреляции операторов поля и теплового резервуара, необходимые для учета диссипации и тепловых шумов, были определены путем применения метода, изложенного в разделе 3.3. Уравнения для флуктуаций двух из четырех параметров Стокса допускают аналитическое решение. Для этих параметров зависимости нормированных на суммарную интенсивность излучения на основной частоте дисперсий найдены путем аналитического интегрирования уравнений.

$$\begin{aligned} v_2(\tau) &= \cosh^2(\tau)\left(1 - \frac{M\tau}{2}\right)^2 + \left(1 - \frac{M\tau}{2}\right)^2 \int_0^\tau D(t) \operatorname{sech}^2(t) dt, \\ v_3(\tau) &= \operatorname{sech}^2(\tau)\left(1 - \frac{M\tau}{2}\right)^2 + \left(1 - \frac{M\tau}{2}\right)^2 \int_0^\tau D(t) \cosh^2(t) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

где $D(\tau) = M\left(1 - \frac{M\tau}{2}\right)^{-4} \frac{2\bar{N} + 1}{4}$ – множитель, описывающий добавочные шумы, $M = L_{nl}/L_{dis}$. Вторые слагаемые представляют собой добавочные флуктуации, возникшие из-

за наличия поглощения в среде. Нормированные дисперсии стоковских параметров S_0 и S_1 определены путем численного решения соответствующих уравнений.

Проведен анализ влияния диссипации на формирование квадратурно- и поляризационно - сжатого света на основной частоте в процессе генерации второй гармоники смешением. Установлено, что в данном процессе имеет место подавление флуктуаций в трех параметрах Стокса. Влияние диссипации, как и в случае кубично - нелинейных сред, приводит к снижению эффективности подавления флуктуаций уже на малых длинах взаимодействия и обуславливает наличие оптимальной длины взаимодействия.

Раздел 4.2 посвящен исследованию перераспределения квантовых флуктуаций на основной частоте в процессе генерации второй гармоники смешением частично когерентных волн. Рассмотрена модель частичной когерентности излучения, в которой предполагается, что каждая мода, помимо когерентной составляющей, содержит N тепловых фотонов.

Решение уравнений

$$\frac{da_1}{dt} = i\beta\hat{A}_2^\dagger\hat{A}_3, \quad \frac{da_2}{dt} = i\beta\hat{A}_1^\dagger\hat{A}_3, \quad \frac{da_3}{dt} = i\beta\hat{A}_1\hat{A}_2, \quad (11)$$

описывающих генерацию второй гармоники в недиссипативном приближении, получено в виде разложения в ряд Тейлора с точностью до членов, пропорциональных второй степени нелинейного коэффициента связи волн, что справедливо для малых коэффициентов преобразования излучения во вторую гармонику.

Для расчета статистических характеристик излучения и параметров Стокса применен формализм матрицы плотности с функцией квазираспределения Глаубера - Сударшана для частично когерентного излучения моды

$$P(\nu) = \frac{1}{\pi N} \exp\left(-\frac{|\nu - \alpha|^2}{N}\right),$$

здесь $|\alpha|^2$ и N - среднее число когерентных и тепловых фотонов в моде.

Найдены дисперсии числа фотонов мод на основной частоте. Установлено, что частичная когерентность обуславливает большие флуктуации интенсивностей мод, по сравнению с полностью когерентным излучением. Определены средние значения и дисперсии параметров Стокса. Показано, что частичная когерентность снижает эффективность подавления флуктуаций, однако, в рассматриваемом процессе могут быть уменьшены как когерентные, так и тепловые флуктуации.

Раздел 4.3 содержит количественные оценки числа тепловых квантов для частот видимого и инфракрасного диапазонов спектра и характерной длины диссипации излучения для данных частот в кварцевом волокне.

В главе 5 представлены результаты исследования квантовых свойств света, генерируемого при встречном параметрическом взаимодействии волн с частотами ω и 3ω в поле низкочастотной интенсивной накачки на частоте 2ω .

Рассмотрено одновременное протекание двух нелинейно-оптических процессов $2\omega \rightarrow \omega + \omega$ и $\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$ при выполнении условий квазисинхронного усиления встречных волн с частотами ω и 3ω в поле волны накачки на частоте 2ω . Реализация таких процессов возможна в кристаллах с регулярной доменной структурой, однако в работе, в целях изучения принципиальной возможности генерации неклассического света и получения наглядных аналитических результатов, использована модель однородной среды. Такой подход оправдан, если характерная длина нелинейного взаимодействия L_{nl} значительно больше периода модуляции нелинейной восприимчивости кристалла.

Найдены значения операторов поля и квадратурных компонент на усиливаемых частотах на выходе из нелинейного кристалла. Рассчитаны значения дисперсий квадратур и исследовано их поведение в зависимости от длины кристалла и соотношения коэффициентов связи волн. Установлено, что перераспределение флуктуаций на частоте 3ω следует интерпретировать как параметрическое усиление при низкочастотной накачке.

Из полученных результатов следует, что при наличии входного сигнала на частоте ω (или 3ω), генерация суммарной (или разностной) частоты сопровождается формированием неклассического состояния света на данной частоте. Установлено, что уровень флуктуаций на высокой частоте (3ω) всегда превышает таковой на низкой частоте (ω). Причина данного эффекта заключается в том, что подавление флуктуаций происходит лишь в процессе параметрического усиления при высокочастотной накачке (процесс $2\omega \rightarrow \omega + \omega$), в результате протекания квазисинхронного преобразования частоты вверх (процесс $\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$) происходит перенос флуктуаций на высокую частоту. Из-за случайного характера генерации излучения на частоте 3ω дополнительного подавления флуктуаций в данном процессе не происходит.

Для генерации сжатого света на частоте 3ω в традиционном процессе параметрического усиления требуется излучение с частотой 6ω . Таким образом, рассмотренный в настоящем разделе процесс параметрического усиления при низкочастотной накачке дает возможность снизить частоту накачки в 3 раза.

В разделе 5.3 приведен анализ корреляционных свойств выходного излучения. Найдены средние значения и дисперсии числа фотонов. Установлено, что среднее число фотонов на усиливаемых волнах с ростом длины взаимодействия стремится к некоторому установившемуся значению, составляющему всего несколько единиц фотонов. Этот результат показывает, с одной стороны, правомерность расчета в использованном приближении, а,

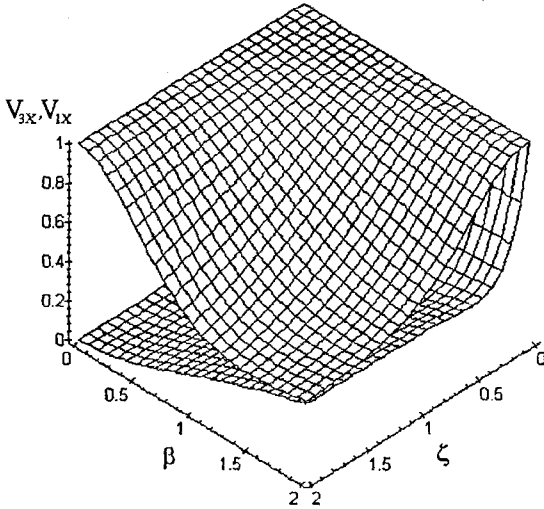


Рис. 2: Дисперсии V_{3X} и V_{1X} в зависимости от нормированной длины нелинейной среды ζ и отношения коэффициентов связи β . Верхняя поверхность относится к V_{3X} , нижняя — к V_{1X} .

с другой, существенное влияние вакуумных флуктуаций на встречное параметрическое взаимодействие. Определен коэффициент корреляции между числами фотонов. Установлено, что выходное излучение на усиливаемых частотах обладает частичной взаимной корреляцией фотонов.

Раздел 5.4 содержит анализ поведения характеристик выходного излучения в зависимости от параметров задачи. Найдено, что флуктуации квадратурных компонент не могут быть снижены до сколь угодно низкого уровня. При этом до нуля могут быть подавлены флуктуации, обусловленные начальным уровнем шума на "своей" частоте, а выходное значение уровня шумов определяется перераспределенными флуктуациями, появившимися в каждой моде вследствие нелинейного взаимодействия. Показано, что статистика выходного излучения суперпуассоновская.

Основные результаты и выводы диссертационной работы сформулированы в заключениях:

1. Показана возможность формирования поляризованно - сжатого света в изотропных гиротропных средах с кубичной нелинейностью. Найдены значения соотношения нелинейных коэффициентов для оптимального подавления квантовых флуктуаций.
2. Исследовано влияние параметрических процессов обмена энергией между взаимодействующими модами на генерацию поляризованно - сжатого света в анизотропных кубично - нелинейных средах. Показано, что энергообмен может приводить к формированию субпуассоновской статистики фотонов одной из мод.
3. Определена область применимости приближения заданного числа фотонов, использованного при анализе параметрических процессов. Для этого найдено точное аналитическое решение классической задачи о взаимодействии двух мод одинаковой частоты в кубично - нелинейной среде. Установлено, что приближение заданного числа фотонов корректно описывает исследуемые эффекты на длинах взаимодействия, не превышающих несколько нелинейных длин.
4. Изучено влияние, оказываемое линейным поглощением излучения, на формирование квадратурно - и поляризованно - сжатого света. Установлено, что поглощение излучения снижает эффективность процессов формирования неклассического света из-за уменьшения интенсивности и появления дополнительных некогерентных шумов. Поглощение обуславливает наличие оптимальной длины взаимодействия, при которой подавление флуктуаций максимально.
5. Проведен анализ встречного параметрического усиления в последовательных взаимодействиях с кратными частотами ω , 2ω и 3ω в средах с квадратичной нелинейностью. Показано, что при накачке на частоте 2ω на встречных усиливаемых волнах с частотами ω и 3ω формируется квадратурно - сжатый свет. Установлена взаимная частичная корреляция фотонов на частотах ω и 3ω .

Список публикаций

1. A.S. Chirkin, V.V. Volokhovskiy, Formation of a nonclassical polarization state in an isotropic gyrotropic nonlinear optical medium. // Journal of Russian Laser Research, 1995, v. 16, pp. 526 - 534.
2. В.В. Волоховский, А.С. Чиркин, Квантовая и классическая теория двухволнового взаимодействия в анизотропных кубично - нелинейных средах. Генерация неклассического света. // Известия РАН, серия физическая, 1996, т. 60, с. 88 - 98.

3. В.В. Волоховский, А.С. Чиркин, Параметрические эффекты при формировании поляризационно - сжатого света в анизотропной кубично - нелинейной среде. // Оптика и спектроскопия, 1997, т. 82, с. 966 - 971.
4. A.S. Chirkin, V.V. Volokhovsky, Polarization - squeezed light formation in cubic - nonlinear medium with dissipation. // Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials, 1997, v. 6, pp. 455 - 465.
5. В.В. Волоховский, А.С. Чиркин, Формирование поляризационно - сжатого света в пространственно - периодической нелинейно - оптической среде с диссипацией. // Квантовая электроника, 1998, т. 25, с. 1049 - 1052.
6. В.В. Волоховский, А.С. Чиркин, О методе учета диссипативных эффектов в квантовых нелинейно - оптических процессах. // Оптика и спектроскопия, 1999, т. 87, с. 641 - 644.
7. V.V. Volokhovsky, Suppression of quantum fluctuation in second harmonic generation with partially coherent radiation. // Laser Physics, 1999, v. 9, pp. 669 - 671.
8. В.В. Волоховский, А.С. Чиркин, Параметрические эффекты при формировании поляризационно - сжатого света в анизотропной кубично - нелинейной среде // VI Международный семинар по квантовой оптике (Минск, 15 - 17 мая, 1996), Тезисы докладов, с. 17.
9. V.V. Volokhovsky, A.S. Chirkin, Influence of dissipation upon quantum nonlinear - optical processes. One simple approach. // VII International Seminar on Quantum Optics (Minsk, May 18-20, 1998), Book of Abstracts and Program, p. 14.
10. В.В. Волоховский, Применение метода вторичного упрощения к квантовым нелинейно - оптическим уравнениям. // В сб. "70 лет Рему Викторовичу Хохлову (юбилейные мероприятия)", Москва, МГУ, 14-16 октября, 1996, с. 12.
11. A.S. Chirkin, V.V. Volokhovsky, Evolution of polarization - squeezed light fluctuations in third - order nonlinear media. // in Fifth International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, Proceedings of a conference held at Balatonfured, Hungary, May 27-31, 1997, edited by D. Han, J. Janszky, Y.S. Kim, V.I. Man'ko, NASA/CP-1998-206855, Greenbelt, 1998, p. 25.

12. V.V. Volokhovskiy, A.S. Chirkin, Polarization - squeezed light in dissipative periodically modulated cubic - nonlinear medium. // XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (Moscow, Russia, June 29 - July 3, 1998), Technical Program, p. 48.
13. V.V. Volokhovskiy, A.S. Chirkin, Influence of dissipation effects on polarization - squeezed light formation at frequency doubling. // Forth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (Evanston, USA, August 22-27, 1998), Technical program, p. 40.
14. V.V. Volokhovskiy, Partial coherence effects in polarization - squeezed light formation in second harmonic generation by mixing. // in Book of Abstracts, Sixth International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations (Naples, Italy, May 24-29, 1999), p. 66.
15. A.S. Chirkin, V.V. Volokhovskiy, Nonclassical light generated by contradirectional consecutive interactions at low frequency pumping. // in Book of Abstracts and Programme, International Conference on Quantum Optics and VIII Seminar on Quantum Optics (Minsk, Belarus, May 28-31, 2000), p. 18.

Издательство ООО "МАКС Пресс".
Лицензия ИД № 00510 от 01.12.99 г.
Подписано к печати 30.08.2000 г.
Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 348.
Тел. 939-3890, 939-3891, 928-1042. Тел./Факс 939-3891.
119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ.