

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 535.21; 537.226;
548.0; 621.378

ПРУДКОВСКИЙ Павел Андреевич

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КВАЗИУПРУГО РАССЕЯННОГО СВЕТА

01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 1997 г.

Работа выполнена на кафедре квантовой радиофизики физического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор А.Н.ПЕНИН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.В.АНДРЕЕВ
доктор физико-математических наук,
профессор М.В.ФЕДОРОВ

Ведущая организация: Физический институт РАН

Защита состоится " 12 " марта 1998 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 053.05.21 физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, по адресу: 119899, Москва, ул. Хохлова, 1, Корпус нелинейной оптики

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан " 3 " февраля 1998 г.

Ученый секретарь диссертационного совета К 053.05.21
кандидат физико-математических наук

М.С.Полякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена исследованию статистических свойств света, полученного в результате рассеяния с относительно малым изменением оптической частоты. В качестве квазиупругого в работе рассматриваются следующие типы рассеяния: рассеяние на ансамбле независимых частиц, рассеяние на акустических волнах, возбужденных специально подготовленным электрическим сигналом и рассеяние света в фоторефрактивных средах.

Исследование статистических свойств такого света, которое также называют спектроскопией флуктуаций интенсивности, представляет интерес по следующим причинам. С одной стороны, из статистических свойств рассеянного света можно получить информацию о рассеивающей среде, которую менее удобно было бы получать другими методами. Этому можно привести немало примеров. Так, интерферометр интенсивностей Брауна-Твисса удобнее для измерения угловых диаметров звезд, чем интерферометр Майкельсона. Кроме того, спектроскопия флуктуаций интенсивности рассеянного света может в некоторых случаях быть удобнее обычной спектроскопии, так как частотное разрешение любого спектрометра имеет верхнюю границу, тогда как с помощью гетеродинамирования возможно зарегистрировать сколь угодно малый сдвиг частот. Наконец, иногда функция распределения интенсивности света может иметь сложную форму, информацию о которой просто невозможно получить другими методами, например для света лазера, находящегося около порога. С другой стороны, в результате рассеяния может быть получен свет с необычными статистическими свойствами. Последние годы считается актуальным поиск источников неклассического света. Однако и в классической области возможно наблюдение света с любопытными свойствами, как показано в главе 4. Такой свет может найти применение в совершенно неожиданных случаях, также как параметрическое рассеяние в свое время нашло применение в безэталоной фотометрии.

Целью работы, таким образом, можно считать исследование связи статистики рассеянного света со свойствами рассеивающей среды; поиск случаев, в которых статистические свойства света несут информацию, которую трудно было бы получить другими способами; и поиск источников света с разнообразными статистическими свойствами.

Актуальность подобных исследований объясняется тем, что несмотря на более, чем сорокалетнюю историю статистической оптики, в ней еще остались пробелы. Так, возможности спектроскопии флуктуаций рассеивающих сред с гауссовым характером подробно изучены в 60-х и 70-х годах. Однако при этом практически не рассматривались пространственные корреляционные функции, из которых также можно получить некоторую информацию. Кроме того, сравнительно новым является использование обратной связи для получения света с нетривиальными статистическими свойствами.

Современная квантовая оптика постоянно демонстрирует красивые эффекты типа различных “квантовых биений”. Однако часто слишком большое значение придается квантовому характеру этих эффектов, тогда как причины наблюдения такой “скрытой интерференции” могут быть чисто классическими (в таких случаях отличие квантового эффекта от классического заключено только в величине видности интерференционной картины). Поэтому наблюдение классических аналогов квантовых эффектов можно считать вполне актуальной задачей. Наконец, несомненно полезным является применение методов статистической оптики для исследования еще не до конца изученных сред, например, таких, как фоторефрактивные.

Практическая ценность диссертации состоит в разработке новых методов статистической оптики для исследования свойств рассеивающих сред и в создании источников света с нестандартными статистическими свойствами.

Научная новизна работы состоит следующем:

- предложен метод получения высоконаправленного яркого источника света с тепловой статистикой, основанный на брэгговской дифракции пучка лазерного света на акустических волнах с гауссовой статистикой;
- экспериментально обнаружена корреляция разнонаправленных мод света, рассеянного в случае двухлучевой накачки на ансамбле независимых частиц или на акустических волнах с гауссовой статистикой. Показано, что в случае большого радиуса корреляции рассеивающей среды этот эффект может использоваться для исследования коррелятора флуктуаций диэлектрической проницаемости среды;
- экспериментально и теоретически изучен классический эффект “скрытой интерференции” света, дифрагированного на акустических волнах с гауссовой статистикой и большой длиной когерентности;
- экспериментально обнаружен и исследован эффект генерации света с аномально большими флуктуациями интенсивности в цепи электрооптической обратной связи; развита математическая модель, позволяющая объяснить поведение света в петле обратной связи.
- экспериментально обнаружен эффект усиления флуктуаций накачки при фоторефрактивном рассеянии света в танталате и ниобате лития, легированных атомами меди, на частотах порядка сотен герц, который не может быть объяснен в рамках обычной феноменологической теории фоторефракции.

На защиту выносятся следующие результаты и выводы из экспериментальных исследований.

1. Обнаружение корреляции интенсивностей противоположно направленных мод света при рассеянии двух встречных накачек в случайно-неоднородной среде. Связь зависимости корреляционной функции интенсивностей света от расстояния между лучами накачек с коррелятором флуктуаций диэлектрической проницаемости рассеивающей среды в случае большого радиуса корреляции среды.

2. Наблюдение картины скрытой интерференции интенсивностей света, рассеянного на акустических волнах со случайной амплитудой и большой длиной когерентности. Теоретическое обоснование этой картины в случае однолучевой накачки.

3. Обнаружение аномально больших флуктуаций интенсивности света в цепи электрооптической обратной связи. Развитие теоретической модели, объясняющей основные закономерности работы электрооптической положительной обратной связи со случайными свойствами. Исследование зависимости дисперсии интенсивности света в петле обратной связи от ее коэффициента передачи.

4. Обнаружение фоторефрактивного отклика танталата и ниобата лития, легированных атомами меди, на временах, на пять порядков меньших максвелловского. Вывод о необходимости модификации общепринятой теории фоторефракции для объяснения подобных фактов.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Международном семинаре по Квантовому Нелинейному Явлению в Оптике и Физике Конденсированных Сред, Россия, Дубна, 5-8 октября 1993г.; на 15-ой Международной конференции по Когерентной и Нелинейной Оптике "ICONO-15", С.-Петербург, 27 июня - 1 июля 1995г.; на Международной конференции "CLEO/EQEC'96", Германия, Гамбург, 8-13 сентября 1996г; и на 15-й Международной конференции по Рамановской Спектроскопии "ICORS'96", USA, Pittsburg, 11-16 августа 1996г.

По теме диссертации опубликовано 6 статей и 3 тезисов докладов, список которых приведен в конце реферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 130 страниц, включая список литературы и 28 рисунков. Список цитированной литературы содержит 160 наименований, включая публикации автора по теме диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ЛИТЕРАТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Глава 1 представляет собой обзор основных понятий, методов и результатов статистической оптики. В целях более последовательного описания глава разбита на четыре раздела, которые отчасти отражают историю развития статистической оптики: долазерный этап (к которому преимущественно относятся только эксперименты Брауна и Твисса [1]), спектроскопия флуктуаций гауссовых рассеивающих сред, поиск сред с негауссовым характером и квантовая оптика. Особое внимание уделено одному из основных инструментов статистической оптики - интерферометру интенсивностей Брауна-Твисса, который неоднократно используется при получении оригинальных результатов.

Оригинальные результаты изложены в главах 2-5.

Глава 2. КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ МОД УПРУГО РАССЕЯННОГО СВЕТА

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию корреляции интенсивностей света, упруго рассеянного случайно-неоднородной средой в случае двухлучевой накачки. Проведение такого исследования является продолжением работы Н.И.Лебедева [2], теоретически предсказавшего корреляцию интенсивностей света, рассеянного в направлениях, связанных с направлениями накачек четырехволновым синхронизмом $\mathbf{k}_{S_1} + \mathbf{k}_{S_2} = \mathbf{k}_{P_1} + \mathbf{k}_{P_2}$, где \mathbf{k}_P - волновые вектора накачки, а \mathbf{k}_S - рассеянного излучения.

Первый параграф посвящен изложению классической теории упругого рассеяния света. При рассмотрении пространственной корреляционной функции интенсивностей света в случае однолучевой накачки показано, что интенсивности рассеянного света не коррелируют, если угол между направлениями их рассеяния больше угла когерентности, зависящего только от длины световой волны и размеров рассеивающего объема.

Во втором параграфе дано краткое изложение работы Н.И.Лебедева, посвященное нахождению вида пространственной корреляционной функции интенсивностей упруго рассеянного света в случае двухлучевой накачки. Основным результатом данной работы является предсказание корреляционных максимумов в направлениях, определенных четырехволновыми синхронизмами:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{S_1} + \mathbf{k}_{S_2} &= \mathbf{k}_{P_1} + \mathbf{k}_{P_2} \\ \mathbf{k}_{S_1} - \mathbf{k}_{S_2} &= \pm(\mathbf{k}_{P_1} - \mathbf{k}_{P_2}) \end{aligned} \quad (1)$$

Кроме того, здесь же дана физическая интерпретация исследуемого эффекта на примере рассеяния двух противоположно направленных накачек на двух независимых рассеивающих частицах. Вследствие осевой симметрии геометрии рассеяния флуктуации интенсивностей света, рассеянного в противоположных направлениях (что соответствует выполнению первого из синхронизмов), вызванные случайным перемещением рассеивающих частиц, происходят синхронно, что и объясняет корреляцию интенсивностей.

Наконец, в третьем параграфе рассмотрено экспериментальное исследование корреляции интенсивностей света, упруго рассеянного случайно-неоднородной средой. В качестве рассеивающей среды использовался ансамбль независимых частиц, представляющих собой: а) капельки молока, взвешенные в воде; б) частички канифоли, образующиеся при ее испарении; в) обыкновенная комнатная пыль. Во всех трех случаях зарегистрирована корреляция интенсивностей света, рассеянного в противоположных направлениях. При

нарушении условия четырехволнового синхронизма корреляция пропадала. Наилучшая зависимость нормированной корреляционной функции g_2 от угловой расстройки синхронизма ϕ , полученная при рассеянии на частичках комнатной пыли, показана на рис.1. По ширине корреляционного максимума был определен размер рассеивающего объема, который в данном случае по порядку величины равен среднему расстоянию между рассеивающими частицами $\ell \cong 40$ мкм .

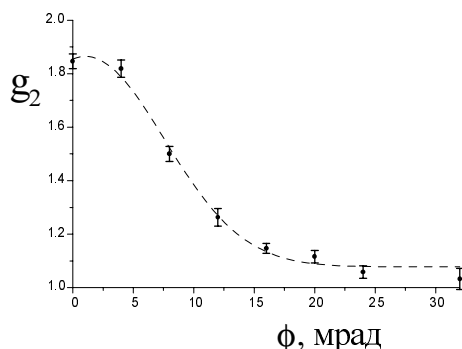


Рис.1. Экспериментальная зависимость нормированной корреляционной функции интенсивностей света, рассеянного в противоположных направлениях, от расстройки синхронизма и ее аппроксимация гауссианой с шириной $\Delta\phi = 13$ мрад.

Глава 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕТА, РАССЕЯННОГО АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ С ГАУССОВОЙ СТАТИСТИКОЙ

В данной главе экспериментально исследованы пространственные корреляционные функции интенсивности света, рассеянного на бегущих акустических ультразвуковых волнах со случайной амплитудой и длиной когерентности, сравнимой с размерами рассеивающего объема. Свет, полученный в результате такого рассеяния, представляет собой удобный источник излучения с тепловой статистикой. Большая величина радиуса корреляции такой среды позволила наблюдать различные картины скрытой интерференции интенсивности рассеянного света. Наконец, корреляция интенсивностей разнонаправленных мод, рассмотренная в предыдущей главе, в данном случае дала возможность изучения коррелятора флуктуаций диэлектрической проницаемости рассеивающей среды.

В первом параграфе рассмотрен метод приготовления акустических волн с контролируемой статистикой. Для создания таких волн использовался обычный акустооптический модулятор (АОМ), на который подавался узкополосный шум. Источником узкополосного шума служил белый дробовой шум фотодетектора, освещенного светом лампы накаливания, пропущенный через резонансный усилитель. В итоге амплитуда акустической волны имела гауссову статистику, а ее длина когерентности определялась шириной спектра шума и контролировалась в экспериментах. В результате брэгговской дифракции однолучевой накачки на бегущей акустической волне свет рассеивался в направлении первого дифракционного максимума. Полученный таким образом пучок света имеет тепловую статистику, то есть дисперсия его интенсивности равна среднему значению. Таким образом, дифракция света на акустических волнах с гауссовой статистикой представляет собой более удобный источник излучения с тепловой статистикой, чем ртутная лампа или лазерный свет, пропущенный через вращающийся матовый диск.

Исследованию пространственной корреляционной функции интенсивности такого света посвящены второй и третий параграфы. Форма дифракционного максимума имеет вид единственного максимума (рис.2а), ширина которого в общем случае зависит как от длины когерентности акустической волны l_{coh} , так и от размера рассеивающего объема d . В то же время, в случае сравнимых длины когерентности и размера рассеивающего объема корреляционная функция интенсивности дифрагированного света, как выяснилось, имеет осциллирующую зависимость от угла между двумя направлениями рассеяния с периодом, зависящем только от размера рассеивающего объема (рис.2б). Теоретическая модель, развитая во втором параграфе, неплохо описывает картину скрытой интерференции.

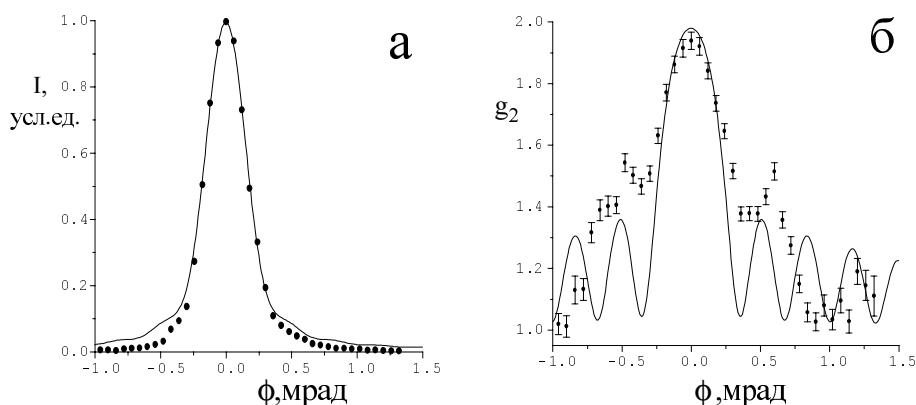


Рис.2. Экспериментальные и теоретические угловые зависимости интенсивности и ее пространственной нормированной корреляционной функции света, рассеянного на акустических волнах с гауссовой статистикой ($l_{\text{coh}}=1.5$ мм; $d/l_{\text{coh}}\approx 1.7$)

Более наглядная картина скрытой интерференции, полученная при пересечении двух пучков света с тепловой статистикой, рассмотрена в четвертом параграфе. Интенсивность света в области пересечения практически не зависит от координаты, тогда как ее корреляционная функция испытывает сильные осцилляции, период которых определяется расстоянием между источниками света, а видность достигает одной трети. Подобный эксперимент уже проводился ранее с тепловым светом, полученным путем пропускания лазерного света через вращающийся матовый диск [3]. В нашем случае он был повторен для теплового света, полученного с помощью дифракции на акустических волнах с гауссовой статистикой.

В пятом параграфе рассмотрена корреляция интенсивностей противоположно направленных мод рассеянного света в случае двухлучевой накачки, аналогичная корреляции, рассмотренной в главе 2. Однако в случае брэгговской дифракции двух противоположно направленных накачек на бегущей волне один из дифрагированных пучков света является стоксовым, тогда как другой - антистоксовым. Поэтому корреляция интенсивностей двух дифрагированных пучков света в этом случае представляет собой классический предел корреляции стоксовой и антистоксовой компонент света при неупругом рассеянии, предсказанной Д.Н.Клышко [4], квантовый случай которой до сих пор экспериментально не зарегистрирован.

Кроме того, такая корреляция предоставляет дополнительные возможности по исследованию свойств рассеивающей среды с большим радиусом корреляции в том случае, когда два противоположно направленных пучка накачки лежат на разных прямых. Зависимость корреляционной функции интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент рассеянного света от расстояния между накачками связана с видом коррелятора флуктуаций диэлектрической проницаемости среды, так как интенсивности света, рассеянные двумя рассеивающими объемами, должны коррелировать до тех пор, пока расстояние между рассеивающими объемами меньше радиуса корреляции среды. На рис.3 показана экспериментальная зависимость нормированной корреляционной функции интенсивностей стоксова и антистоксова дифрагированных пучков от расстояния между рассеивающими объемами. При выводе теоретической кривой, показанной на том же графике, был использован экспоненциальный вид коррелятора амплитуды акустической волны, что наиболее точно соответствует лоренцевой функции пропускания резонансного усилителя. Наилучшее соответствие экспериментальным данным наблюдается при $l_{\text{coh}}=0.35\pm 0.03$ мм, что достаточно близко к длине когерентности акустической волны, полученной из ширины полосы пропускания резонансного усилителя $l_{\text{coh}}=0.47\pm 0.06$ мм.

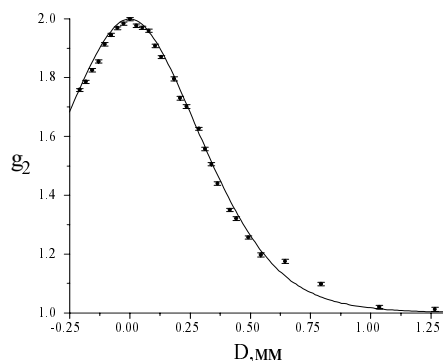


Рис.3. Экспериментальная зависимость нормированной корреляционной функции интенсивностей дифрагированных стоксова и антистоксова пучков света от расстояния между пучками накачек и ее теоретическая аппроксимация, учитывающая экспоненциальный вид коррелятора амплитуды акустической волны.

Глава 4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕТА В ЦЕПИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ СО СЛУЧАЙНЫМ ХАРАКТЕРОМ

Глава 4 посвящена изучению статистических свойств света в цепи электрооптической обратной связи (ОС), схема которой показана на рис.4. Неубывающий в течение последних десяти лет интерес к свойствам света в цепи электрооптической ОС объясняется возможностью подавления в ней квантовых флуктуаций света, впервые обнаруженная Y.Yamamoto с сотрудниками [5]. Рекордное подавление было достигнуто в работах А.В.Масалова [6], в которых замыкание ОС производилось с помощью фотодетектора и АОМ. Однако оказалось, что небольшое отличие схемы на рис.4 от схемы ОС Масалова может привести к принципиальным изменениям статистических свойств света в цепи ОС.

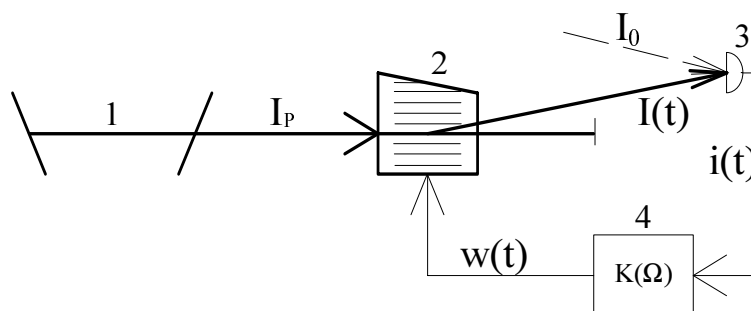


Рис.4. Схема экспериментальной установки: 1 - лазер; 2 - акустооптический модулятор; 3 - фотодетектор; 4 - резонансный усилитель. Штриховой линией показана дополнительная засветка.

Качественное описание процессов в цепи ОС, состоящей из АОМ, фотодетектора (ФЭУ) и резонансного усилителя, приведено в первом параграфе. Принципиальное отличие данной схемы от схемы ОС Масалова заключается в том, что в нашем случае фотодетектор регистрирует только амплитудные флуктуации света, тогда как в схеме Масалова на фотодетекторе регистрируется сигналный пучок света интерферирующий с опорным, то есть ФЭУ регистрировал и фазовые флуктуации излучения. В результате в нашей схеме центральная частота резонансного усилителя не является выделенной частотой ОС, что приводит к тому, что ОС становится нелинейной. Качественный анализ процессов в цепи ОС, проведенный в рамках классической статистической оптики, показал, что ОС замыкается только благодаря существованию дробового шума фотодетектора, что приводит к случайному характеру ОС.

Теоретическое рассмотрение динамики среднего значения интенсивности и ее дисперсии в цепи ОС проведено во втором и третьем параграфах. Все соотношения, полученные в них, базируются на системе уравнений, описывающей связь между интенсивностью света в цепи ОС $I(t)$, фототоком $i(t)$ и электрическим сигналом $w(t)$ на выходе резонансного усилителя:

$$I(t) = \eta^2 I_p |w(t)|^2; \quad (2)$$

$$w(\Omega) = K(\Omega) e^{i\Omega \tau_3} i(\Omega); \quad (3)$$

$$i(t) = \sum_{j=1}^m F(t - t_j), \quad 0 \leq t_j \leq T; \quad (4)$$

где I_p - интенсивность лазерного пучка, η определяется эффективностью дифракции; $w(\Omega)$ - спектральная составляющая сигнала $w(t)$, τ_3 - полное время задержки сигнала в оптоэлектронной петле, $K(\Omega)$ - функция пропускания резонансного усилителя; $F(t)$ - форма одиночного импульса фотодетектора, t_j - случайные моменты появления импульсов, а количество импульсов, появившихся за некоторое время T , определяется пуассоновской функцией распределения.

При выводе уравнения для среднего значения интенсивности света в цепи был получен параметр S , выражающийся через комбинацию параметров АОМ, ФЭУ и резонансного усилителя, имеющий смысл среднего значения коэффициента передачи цепи ОС и являющийся основным управляющим параметром системы. Далее было получено интегральное уравнение для корреляционной функции интенсивности света, численное решение которого методом последовательных приближений позволило получить зависимость второго нормированного момента интенсивности света в цепи ОС g_2 от коэффициента S . Основным результатом развитой теории следует считать объяснение экспериментально наблюдающегося факта возникновения anomalно больших флуктуаций интенсивности света в цепи ОС ($g_2 \gg 1$), являющегося следствием случайности коэффициента передачи ОС.

Четвертый параграф посвящен описанию экспериментальной установки, позволяющей измерять как коэффициент передачи ОС S , так и второй момент интенсивности света методом Брауна-Гвисса. Как экспериментально полученная, так и теоретическая зависимость $g_2(S)$ показана на рис.5. На графике видно, что теория качественно верно объясняет наблюдающуюся зависимость дисперсии интенсивности света от коэффициента S .

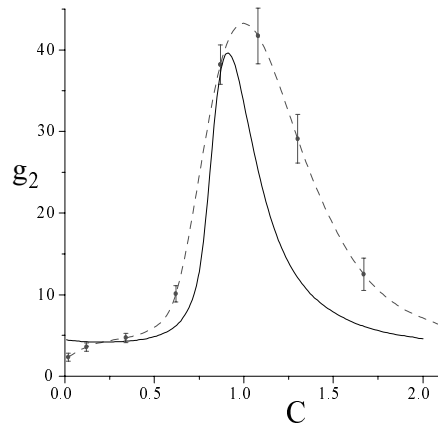


Рис.5. Экспериментальная и теоретическая зависимости второго нормированного момента интенсивности света g_2 в цепи ОС от коэффициента передачи C . Пунктиром дана сплайн-аппроксимация экспериментальных значений.

Наконец, в пятом параграфе рассмотрено модельное интегральное уравнение со случайным ядром, позволяющее наглядно описывать процессы в цепи ОС, а также более удобное для нахождения корреляционных функций или моментов интенсивности в цепи ОС:

$$I(t) = \frac{2\Delta\Omega}{\sqrt{\pi}} C \int_0^{\infty} \{(1 + \xi)(I + I_0)\}_{t-\tau_3-\tau} e^{-\Delta\Omega^2 \tau^2} d\tau, \quad (5)$$

где $\Delta\Omega$ - ширина полосы пропускания резонансного усилителя, τ_3 - время задержки сигнала в цепи ОС, а ξ - белый дробовой шум фотодетектора. Таким образом, случайность электрооптической цепи ОС позволяет в рамках классической статистической оптики объяснить появление в ней супергруппированного света.

Глава 5. НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК ТАНТАЛАТА И НИОБАТА ЛИТИЯ ПРИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОМ РАССЕЯНИИ СВЕТА И ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ РАССЕЯНИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ТИПА

Последняя, пятая глава посвящена применению методов статистической оптики для исследования еще не до конца изученных процессов рассеяния света в фоторефрактивных средах, то есть в средах, показатель преломления которых меняется под действием света. Данное исследование продолжает работы К.Н.Забродина [7] по изучению флуктуаций рассеянного излучения при фотоиндуцированном рассеянии света (ФИРС) и параметрическом рассеянии голографического типа (ПРГТ) в кристаллах ниобата и танталата лития, легированных атомами меди. В результате исследования преобразования флуктуаций накачки при ФИРС и ПРГТ был обнаружен фоторефрактивный отклик этих кристаллов на частотах порядка сотен герц, что не может быть объяснено в рамках общепринятой феноменологической теории фоторефракции.

В первом параграфе дан краткий обзор истории фоторефракции и, в частности, ФИРС и ПРГТ. Фотоиндуцированным рассеянием света называют самосогласованное возрастание амплитуд хаотических голографических решеток в кристалле, освещенном одним пучком накачки, и дифракцию на них. Обычно такой процесс называют “оптическим повреждением” и стремятся избавиться от него, так как оно существенно портит волновой фронт накачки. Амплитуды голографических решеток, рассеивающих свет в направлениях, для которых выполняется условие фазового синхронизма $2\mathbf{k}_P = \mathbf{k}_{S_1} + \mathbf{k}_{S_2}$, где индексом P обозначена накачка, а индексами S_j - моды рассеянного света, возрастают значительно быстрее, так как на них взаимодействуют друг с другом не две, а три световых моды. Рассеяние света на этих решетках называют ПРГТ, которое выглядит как яркий узкий конус на фоне широкоугольного ФИРС. Сдвиг частот при таком рассеянии определяется максвелловским временем $\tau_m = \epsilon_0 / 4\pi\sigma$, где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость среды, а σ - ее проводимость, - единственным временным параметром феноменологической теории фоторефракции, который в ниобате и танталате лития имеет порядок часов или дней.

Во втором параграфе рассмотрен эксперимент, который позволил обнаружить усиление осцилляций интенсивности накачки на частотах порядка сотен герц в процессе ФИРС и ПРГТ, то есть на временах, на пять порядков меньших максвелловского времени, что невозможно объяснить в рамках общепринятой теории фоторефракции. Для экспериментального исследования коэффициента усиления осцилляций интенсивность накачки модулировалась на одной или двух частотах, далее измерялись автокорреляционные функции интенсивности накачки и рассеянного света. Типичный пример таких автокорреляционных функций показан на рис.6а. На графике явно видно, что глубина модуляции на обоих частотах для ПРГТ значительно больше, чем для интенсивности накачки. Спектр флуктуаций интенсивности определялся как Фурье-преобразование автокорреляционной функции (рис.6б). Коэффициент усиления флуктуаций на какой-либо частоте модуляции определялся по отношению спектральных компонент флуктуаций интенсивности рассеянного света и накачки на этой частоте.

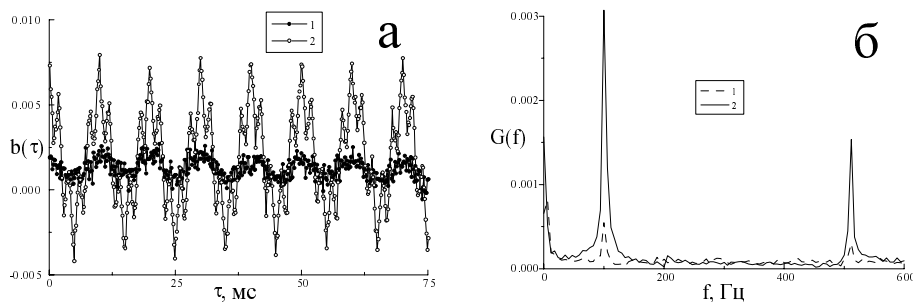


Рис.6. Типичный пример автокорреляционной функции $b(\tau)$ (а) и спектра флуктуаций $G(f)$ (б) интенсивности накачки, модулированной на частотах 100Гц и 500Гц (1), и света, рассеянного в результате ПРГТ oo-ee типа в $\text{LiTaO}_3:\text{Cu}$ (2).

Коэффициент усиления осцилляций интенсивности накачки исследовался как функция времени в процессе развития рассеяния ФИРС или ПРГТ в $\text{LiTaO}_3:\text{Cu}$ и в $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ в случае модуляции накачки как на одной, так и на двух частотах. Полученные зависимости позволили сформулировать следующие выводы о фоторефрактивном отклике танталата и ниобата лития:

- Усиление осцилляций интенсивности накачки при рассеянии в фоторефрактивных танталате и ниобате лития уверенно наблюдается на частотах от 100Гц до 1кГц.

- Эффект усиления осцилляций наблюдается в танталате лития в любых условиях, тогда как в ниобате лития он имеет место лишь в течение динамического режима, в котором происходит быстрый рост голографических решеток.

- Усиление осцилляций при ФИРС и ПРГТ свидетельствует о том, что голографические решетки, записанные в кристалле, успевают изменяться вместе с изменениями интенсивности накачки.

- Усиление осцилляций с периодом, много меньшим максвелловского времени среды, свидетельствует о существовании нового, пока что не известного, механизма фоторефракции, обладающего значительно меньшим характерным временем.

- Механизм усиления имеет, по-видимому, стохастическую природу, приводящую к сильным флуктуациям коэффициента усиления, и, возможно, взаимодействию процессов усиления осцилляций на разных частотах.

В третьем параграфе рассмотрены два возможных пути объяснения наблюдаемого эффекта, основанные на учете фоторефракции на свободных электронах в зоне проводимости [8] и на возможности изменения максвелловского времени среды в нестационарных условиях вследствие увеличения концентрации нетермализованных носителей заряда, имеющих значительно большую подвижность [9].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При квазиупругом рассеянии двухлучевой накачки наблюдается корреляция интенсивностей света, рассеянного в направлениях, удовлетворяющих условию четырехволнового синхронизма

$$\mathbf{k}_{S_1} + \mathbf{k}_{S_2} \approx \mathbf{k}_{P_1} + \mathbf{k}_{P_2} .$$

Если радиус корреляции рассеивающей среды больше или сравним с размером рассеивающего объема, то по спадаанию этой корреляции при параллельном разведении двух накачек можно судить о виде коррелятора флуктуаций диэлектрической проницаемости среды.

2. При брэгговской дифракции пучка лазерного света на акустических ультразвуковых волнах с гауссовой статистикой дифрагированный пучок света представляет собой высоконаправленный яркий источник света с тепловой статистикой, выгодно отличающийся от общеизвестных источников света с тепловой статистикой: ртутной лампы или лазерного света, пропущенного через вращающийся матовый диск.

3. При дифракции света на акустических волнах с гауссовой статистикой и длиной когерентности, сравнимой с размером рассеивающего объема, пространственная корреляционная функция интенсивности дифрагированного пучка света имеет особенности, не наблюдающиеся в профиле интенсивности. Характерный угловой масштаб этих особенностей зависит от размера рассеивающего объема, тогда как угловая ширина дифракционного максимума определяется длиной когерентности звуковых волн. Более наглядная картина такой “скрытой интерференции” наблюдается в поле двух независимых пучков света с тепловой статистикой.

4. При замыкании электрооптической обратной связи с помощью фотодетектора и акустооптического модулятора при условии отсутствия опорного пучка накачки на фотодетекторе в петле обратной связи возможно появление света с аномально большими флуктуациями интенсивности. Причина появления такого света заключается в том, что обратная связь замыкается благодаря существованию дробового шума фотодетектора, что приводит к случайному характеру коэффициента преобразования обратной связи. Полученный таким образом свет можно называть классическим супергруппированным светом.

5. При фотоиндуцированном рассеянии света и параметрическом рассеянии голографического типа в фоторефрактивных танталате и ниобате лития, легированных атомами меди, наблюдается усиление осцилляций

интенсивности накачки на частотах порядка сотен герц. Такое усиление свидетельствует о наличии фоторефрактивного отклика на этих частотах, что не может быть объяснено в рамках общепринятой теории фоторефракции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R.Hanbury Brown, R.Q.Twiss; Nature, 1956, v.177, №4497, p.27-29
- [2] Н.И.Лебедев; Вестник МГУ, сер.3, 1982, т.23, №5, с.41-43
- [3] A.V.Haner, N.R.Isenor; Amer.J.of Phys., 1970, v.38, №6, p.748-750
- [4] Д.Н.Клышко; Квантовая электроника, 1977, т.4, №6, с.1341-1350
- [5] Y.Yamamoto, N.Imoto, S.Mashida; Phys.Rev.A, 1986, v.33, №5, p.3243-3261
- [6] A.V.Masalov, A.A.Putilin, M.V.Vasiliev; J.of Mod.Opt., 1994, v.41, №10, p.1941-1953
- [7] A.Penin, K.Zabrodin; Proc. of SPIE-1841 "Nonlinear Opt.Processes in Solids", 1991, p.266-286
- [8] A.L.Smirl, G.C.Valley, R.A.Mullen, K.Bokznert, C.D.Mire, T.F.Bogges; Opt.Lett., 1987, v.12, №7, с.501-503
- [9] А.П.Леванюк, А.Р.Погосян, Е.М.Уюкин; ДАН, 1981, т.256, с.60-63

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

- 1. С.П.Кулик, А.Н.Пенин, П.А.Прудковский. Корреляция электромагнитных полей в разнонаправленных модах при упругом рассеянии света// ЖЭТФ, - 1994, - Т.106, №4, - С.993-1000.
- 2. С.П.Кулик, А.Н.Пенин, П.А.Прудковский, М.В.Чехова. Корреляция интенсивностей при квазиупругом рассеянии света// ЖЭТФ, - 1996, - Т.110, №5, - С.1712-1726.
- 3. M.V.Chekhova, S.P.Kulik, A.N.Penin, P.A.Prudkovskii. Intensity interference in Bragg scattering by acoustic waves with thermal statistics// Phys.Rev.A, - 1996, - V.54, №6, - P.R4645-R4648.
- 4. M.V.Chekhova, S.P.Kulik, A.N.Penin, P.A.Prudkovskii. Fourth-order interference of quasi-thermal light beams generated in an acoustic cell// Opt.Comm., - 1996, - V.132, - P.15-18.
- 5. П.А.Прудковский, О.В.Скугаревский, А.Н.Пенин. Нелинейный отклик фоторефрактивных танталата и ниобата лития на звуковых частотах// ЖЭТФ, - 1997, - Т.112, №.10 - С.1490-1498
- 6. П.А.Прудковский, О.В.Скугаревский. Избирательная анизотропная дифракция на шумовых голографических решетках в танталате лития// Оптика и спектроскопия, - 1997, - Т.82, №3, - С.503-507.
- 7. A.N.Penin, M.V.Chekhova, S.P.Kulik, P.A.Prudkovskii, Correlation of photons in the scattered light; Proc. of 15-th ICONO'95, Russia, St.-Petersburg, 27 June - 1 July 1995, p.269-270; Proc. of SPIE, 1995, v.2799, p.131-138
- 8. S.P.Kulik, M.V.Chekhova, A.N.Penin, P.A.Prudkovskii, Fourth-order interference in light scattering by acoustic waves; Proc. of EQEC'96, Germany, Hamburg, 8-13 September 1996, p.172
- 9. S.P.Kulik, M.V.Chekhova, A.N.Penin, P.A.Prudkovskii, Interference of intensities in light scattered by thermal phonones; Proc. of ICORS'96, USA, Pittsburg, 11-16 August 1996, v.2, p.95-96