



КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Авторы: А. С. Чиркин

КВАНТОВАЯ ОПТИКА, раздел оптики, в котором для изучения свойств света и его взаимодействия с веществом используют принципы квантовой механики (корпускулярно-волновой дуализм, векторы состояния, представления Гейзенберга и Шрёдингера и т. д.).

Зарождение квантовой теории света относится к 1900, когда М.[Планк](#) для объяснения спектрального распределения электромагнитной энергии, излучаемой тепловым источником, постулировал поглощение и испускание её дискретными порциями. Идея дискретности легла в основу вывода формулы, носящей его имя, и послужила толчком для создания квантовой механики. Однако оставалось неясным, является ли источником дискретности вещество или сам свет. В 1905 А. [Эйнштейн](#) опубликовал теорию фотоэффекта, в которой показал, что его можно объяснить, если свет рассматривать как поток частиц (квантов света), названных впоследствии [фотонами](#). Фотоны имеют энергию

$$E = h\nu$$

h – постоянная Планка,

ν – частота света) и распространяются со скоростью света. Позднее Н.[Бор](#) показал, что атомы могут испускать свет дискретными порциями. Т. о., свет рассматривается и как электромагнитная волна, и как поток фотонов. Квантованное световое поле относится к статистич. объектам, и его состояние определяется в вероятностном смысле.

Создание в 1960 [лазера](#) – принципиально нового источника излучения по сравнению с тепловым – стимулировало исследования статистич. характеристик его излучения. Эти исследования связаны с измерением распределения фотонов лазерного излучения и когерентности поля. Нелазерные источники света являются, по существу,

источниками случайных световых полей с гауссовой статистикой поля. Изучая статистику лазерного излучения, Р. [Глаубер](#) ввёл понятие [когерентного состояния](#), которому хорошо соответствует излучение лазера, работающего в режиме над порогом генерации. В 1977 амер. физик Дж. Кимбл впервые наблюдал т. н. антигруппировку фотонов (см. ниже), которую можно было объяснить с помощью квантовой теории.

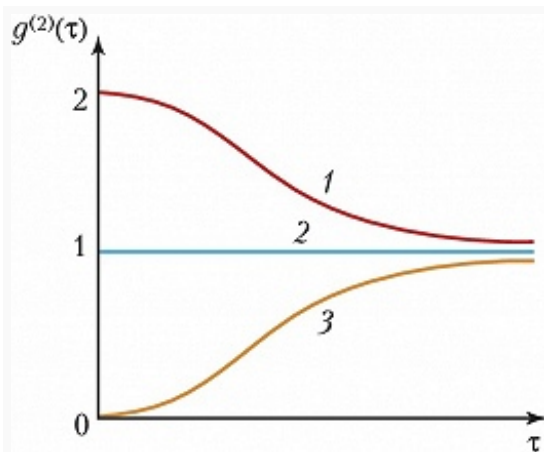


Рис. 2. Корреляционные функции второго порядка $g^{(2)}(\tau)$ для различных излучений: теплового (1), лазерного (2) и резонансной флуоресценции (3).

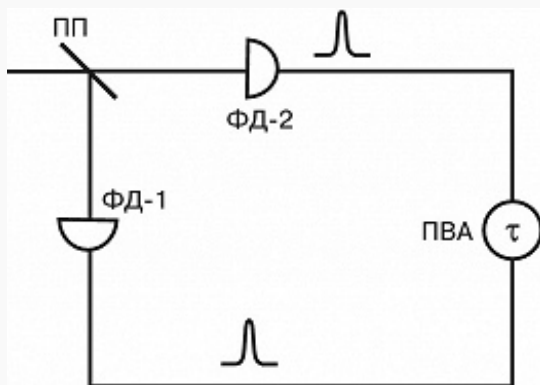


Рис. 1. Схема измерения корреляционной функции второго порядка: ПП – светоделительная полупрозрачная пластинка; ФД-1 и ФД-2 – фотодетекторы; ПВА – преобразователь время-амплитуда, ко...

С кон. 20 в. К. о. интенсивно развивается. Она тесно связана с нелинейной и атомной оптикой, квантовой теорией информации. Одним из наиболее удобных способов определения состояния светового поля является измерение корреляционных функций. Простейшая из них – полевая корреляционная функция, характеризующая связь полей в разл. пространственно-временных точках. Она полностью характеризует поле теплового источника излучения, однако не позволяет отличить источники с др. статистич. свойствами от тепловых. В этом отношении важную роль играет корреляционная функция числа фотонов (интенсивностей) второго порядка $g^{(2)}(\tau)$, содержащая сведения о распределении времён запаздывания τ испускания фотонов. С её помощью измеряют эффекты группировки и антигруппировки фотонов. Свет от источника поступает на светоделительную пластинку (рис. 1), после которой он подаётся на два фотодетектора. Регистрация фотона сопровождается появлением импульса на выходе детектора. Импульсы с детекторов поступают в

устройство, которое измеряет время задержки

между ними. Эксперимент повторяется много раз. Таким способом измеряют распределение времён задержки, которое связано с функцией

$g^{(2)}(\tau)$. На рис. 2 изображена зависимость

$g^{(2)}(\tau)$ для трёх типичных источников света – теплового, лазера и резонансной флуоресценции. При

$\tau \rightarrow \infty$ значения функций для теплового источника и резонансной флуоресценции приближаются к единице. Для лазерного излучения

$g^{(2)}(\tau) = 1$ и статистика фотонов пуассоновская. Для теплового источника

$g^{(2)}(0) = 2$ и более вероятно обнаружить два фотона приходящими сразу друг за другом (эффект группировки фотонов). В случае резонансной флуоресценции

вероятность испускания атомом сразу двух фотонов равна нулю (антигруппировка фотонов). Значение

$g^{(2)}(0) = 0$ обусловлено тем, что между двумя последовательными актами излучения фотонов одним атомом существует время задержки. Этот эффект объясняется полной квантовой теорией, которая с квантовой точки зрения описывает и среду, и электромагнитное поле.

С эффектом антигруппировки тесно связана субпуассоновская статистика фотонов, для которой функция распределения уже, чем пуассоновское распределение.

Поэтому уровень флуктуаций в фотонных пучках с субпуассоновской статистикой меньше уровня флуктуаций когерентного излучения. В предельном случае такие неклассич. поля имеют строго определённое число фотонов (т. н. фоксовское состояние поля). В квантовой теории число фотонов является дискретной переменной.

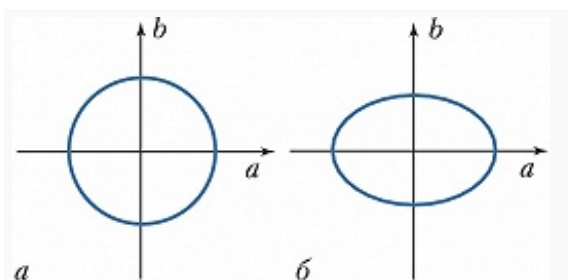


Рис. 3. Область флуктуаций на входе (а) и выходе (б)

Методами нелинейной оптики могут быть созданы неклассич. световые поля, у которых, по сравнению с когерентными полями, уменьшен уровень квантовых флуктуаций некоторых непрерывных переменных, напр. квадратурных компонент или стоксовых параметров, характеризующих состояние

вырожденного оптического параметрического усилителя.

поляризации поля. Такие поля называют сжатыми. Интерпретировать формирование сжатых полей можно на классич. языке.

Выразим напряжённость электр. поля

E через квадратурные компоненты

a и

b :

$E(t) = a(t)\cos\omega t + b(t)\sin\omega t$, где

$a(t)$ и

$b(t)$ – случайные функции,

$\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота,

t – время. При подаче такого поля на вырожденный оптич. параметрич. усилитель (ВОПУ) с частотой накачки

2ω одна квадратурная компонента (напр.,

a) может усиливаться благодаря его фазовой чувствительности, а др. квадратура (b) подавляться. Вследствие этого флуктуации в квадратуре

a возрастают, а в квадратуре

b уменьшаются. Трансформация уровня шума в ВОПУ изображена на рис. 3. На рис.

3, б область флуктуаций по сравнению с входным состоянием (рис. 3, а) сжата.

Подобным образом ведут себя при параметрич. усилении квантовые флуктуации вакуумного и когерентного состояний. Конечно, в этом случае квантовомеханич.

соотношение неопределённостей не нарушается (происходит как бы

перераспределение флуктуаций между квадратурами). В параметрич. процессах

формируется, как правило, излучение с суперпуассоновской статистикой фотонов, для которой уровень флуктуаций превышает таковой для когерентного света.

Для регистрации сжатых полей используют балансные гомодинные детекторы,

которые могут регистрировать лишь одну квадратуру. Т. о., уровень флуктуаций при

фотодетектировании сжатого света может быть ниже уровня стандартного

квантового предела (дробового шума), соответствующего регистрации когерентного

света. В сжатом свете флуктуации могут быть подавлены до 90% по отношению к

когерентному состоянию. Методами нелинейной оптики получают также

поляризационно-сжатый свет, в котором подавлены флуктуации по крайней мере в одном из стоковых параметров. Сжатый свет представляет интерес для прецизионных оптико-физич. экспериментов, в частности для регистрации гравитац. волн.

С квантовой точки зрения рассмотренный параметрич. процесс представляет собой процесс распада фотона накачки с частотой 2ω на два фотона с частотой ω . Иначе говоря, фотоны в сжатом свете создаются парами (бифотоны), и функция их распределения радикально отличается от пуассоновской (имеется только чётное число фотонов). Это другое необычное свойство сжатого света на языке дискретных переменных.

Если фотоны накачки в параметрич. процессе распадаются на два фотона, которые различаются частотами и/или поляризациями, то такие фотоны коррелированы (связаны) между собой. Обозначим частоты родившихся фотонов как

ω_1 и

ω_2 , и пусть фотоны имеют соответственно вертикальную (

V) и горизонтальную (

H) поляризации. Состояние поля в этом случае на квантовом языке записывается в виде

$|\psi\rangle = |V\rangle_1 |H\rangle_2$. Оказывается, что при определённой ориентации нелинейно-оптич. кристалла, в котором наблюдается параметрич. процесс, фотоны той же частоты, распространяющиеся в том же направлении, могут рождаться с ортогональными поляризациями. В результате состояние поля принимает вид:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|V\rangle_1 |H\rangle_2 + |H\rangle_1 |V\rangle_2).$$

(Появление коэф. перед скобкой связано с условием нормировки.)

Состояние фотонов, описываемое соотношением (*), называют перепутанным; это означает, что если фотон частоты ω_1 поляризован вертикально, то фотон частоты

ω_2 – горизонтально, и наоборот. Важное свойство перепутанного состояния (*) заключается в том, что измерение состояния поляризации одного фотона проектирует состояние фотона др. частоты в ортогональное. Состояния типа (*) называют также парами Эйнштейна – Подольского – Розена и перепутанными состояниями Белла. В перепутанном состоянии могут находиться квантовые состояния атомных систем, а также состояния атомов и фотонов. С применением фотонов в перепутанных состояниях проведены эксперименты по проверке неравенства Белла, квантовая телепортация и квантовое плотное кодирование.

На основе параметрич. оптич. взаимодействий, а также эффекта кросс-взаимодействий осуществлены квантовые неразрушающие измерения соответственно квадратурных компонент и числа фотонов. Применение методов К. о. при обработке оптич. изображений позволяет улучшить их запись, хранение и считывание (см. [Квантовая обработка изображений](#)).

Квантовые флуктуации электромагнитного поля в вакуумном состоянии могут проявляться своеобразно: они приводят к возникновению силы притяжения между проводящими незаряженными пластинами (см. [Казимира эффект](#)).

К К. о. относят и теорию флуктуаций лазерного излучения. Её последовательная разработка базируется на квантовой теории, которая даёт корректные результаты для статистики фотонов и ширины линии лазерного излучения.

К. о. занимается также исследованиями взаимодействия атомов со световым полем, воздействия света на двух- и трёхуровневые атомы. При этом обнаружен ряд интересных и неожиданных эффектов, связанных с атомной когерентностью: квантовые биения (см. [Интерференция состояний](#)), [Ханле эффект](#), [фотонное эхо](#) и др.

В К. о. изучают также охлаждение атомов при взаимодействии со светом и получение бозе-эйнштейновского конденсата, а также механич. воздействие света на атомы с целью их захвата и управления.

Литература

Лит.: Клышко Д. Н. Неклассический свет // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. Вып. 6; Баргатин И. В., Гришанин Б. А., Задков В. Н. Запутанные квантовые состояния атомных систем // Там же. 2001. Т. 171. Вып. 6; Физика квантовой информации / Под ред. Д. Боумейстера и др. М., 2002; Скалли М. О., Зубайри М. С. Квантовая оптика. М., 2003; Шляйх В. П. Квантовая оптика в фазовом пространстве. М., 2005.