

压 缩 光

彭 莖 焜

(山西大学光电研究所,太原 030006)

本文着重介绍了压缩光及其产生的机制,概述了压缩光的几何表示、应用前景及国内外发展的简况。

我们知道,最精密的测量方法之一是光学测量方法,由量子力学中的测不准原理知,光波总是存在着某一极小的起伏,此起伏产生于光波的量子性,它从根本上限制了利用光来进行观察和测量的精度。世界上存在绝对“安静”的光波吗?能制作无任何规起伏的光束吗?这是物理学家在相当一段时间内十分关心的问题。近几年来经过几个研究小组的努力^[1],发现了光束中起伏(量子噪声)在某些情况下可以被“压缩”,即是光波一部分的噪声比压缩前减小了,同时光波的另一部分的噪声增加了。这样的光波称为压缩光。

光是由振动的电磁场构成。从经典物理的观点来看,振动的场能用一光滑的波来表示,它的形状可以准确确定;然而由量子力学的测不准原理知,这样精确程度是不可能达到的,只能将波的形状确定到一定范围,此不确定范围是波的噪声的表现,亦是表现了电磁波很小的无规的起伏。

在光学谐振腔中的光波是由振荡的电场和磁场构成。在经典物理中,单模激光可视为相干光,它可以用光滑的细线描绘出来,因为在任何时候我们都能准确地确定电场和磁场的强度,如图1所示。但是,根据量子力学知,电磁场的强度仅仅能确定到一定范围之内,被测量的场强在任何地方的起伏都在此范围之内,如图2所示。甚至无任何光源的“黑暗”中仍然存在一定大小的噪声,如图3所示。在经典物理中表示“黑暗”的波是平的、无任何起伏的,而在量子力学中我们仅仅能讲这个波是平到仍具有很小起伏。使用专业术语来讲,则是说甚至

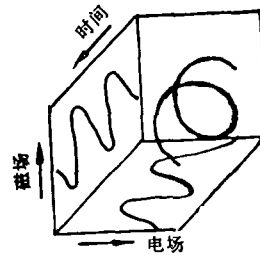


图1 在经典物理中相干光可用一光滑细线描绘出来

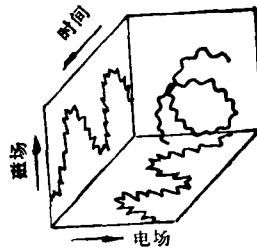


图2 在量子力学中相干光的电磁场强度只能被确定到一定范围之内

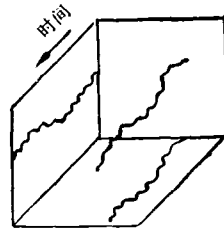


图3 在无任何光源存在的“黑暗”中仍然存在一定大小的起伏

在真空,在没有外部光源时的电磁场中仍然存在小的起伏。这种起伏称为真空起伏,它是一般光场起伏的下限;普通一束光波可以看成绒毛似的无规真空起伏叠加到由经典物理描绘的光滑的波上。可以这样讲,经典波同真空起伏

的干涉引起了光波的噪声，正是这种量子噪声存在，从根本上限制了光学测量精度及光计算机和光通信等技术的功能。压缩光提供了一种方法，它使破坏测量精度的噪声能从光束的一个部分被压缩。使用压缩光去观察和探测仅仅是用光波的压缩部分而不是噪声增大部分，因此我们能进行更精确的测量，其测量精度可超越测不准原理给出的限制。这并不违反测不准原理，因为这仅仅是测不准量及时地重新进行了分布，而我们利用的只是噪声减小部分进行测量操作。

一、产生压缩光的物理机制

为了帮助我们理解压缩光产生的机制，先作一个具体的比喻：电磁场振荡在某些方面类似于小孩打秋千的运动，秋千振荡具有特殊的频率和振幅，如同两光波一样，在两个秋千上两个小孩若同时达到运动顶点，我们讲两个孩子在秋千振荡中同位相；反之，在不同时候达到运动的顶点，则两小孩在运动中不同相。若小孩在秋千接近振荡顶点时蹲下，在秋千接近地面时站直起来（反抗离心力作功），则小孩将对秋千进行泵浦使秋千运动得到放大，秋千将愈荡愈高；反之，若小孩在秋千接近地面时蹲下，在接近顶点时站直起来，则小孩将衰减秋千的运动，秋千在下一往返中只能达到较低高度。很清楚小孩泵浦秋千运动具有两个重要特点：第一是在秋千的每个来回中，小孩站起来和蹲下各两次，用术语讲就是泵浦作用的频率是秋千运动频率的两倍；第二个特点是秋千的放大和衰减依赖站起来和蹲下的相对位相，在上例中即是依赖于小孩是否在循环的顶点站立或蹲下。

一种类似的泵浦形式能用到腔中光波上，腔具有一定长度，腔两端是反射镜，设腔的长度精确等于光波波长整数倍，当光波被腔镜反射和自身干涉，在腔内便形成驻波。现在假设在腔一端的反射镜可以往返运动，即是腔长可以改变。当反射镜移动频率精确地是光频的两倍时，到达镜上光波将得到放大或减小，这意味

着腔长改变将增加光波能量或从光波中抽取能量。若镜子运动相对于光波具有正确位相，则光波将被放大，电磁振荡趋向增强；反之，光波则被衰减，电磁振荡趋向减弱。

现在让我们再回到小孩荡秋千的比喻，我们设想整个操场上充满了荡秋千的小孩，他们具有相同振荡频率但并不同位相，在某个时刻某些小孩可以到达振荡的顶点，而另一些小孩则处在接近地面的位置。设有一位教师在操场中发出站起一蹲下一站起一蹲下……的口令，发口令的频率精确地等于秋千振荡频率的两倍。当某些小孩接近地面而一些接近振荡顶点时，同时听到教师发出站直起来的口令，那些接近地面的小孩站起来将放大秋千的振荡，而接近振荡顶点小孩站起来将衰减秋千的振荡，最后前者将以愈来愈大振幅振荡，而后者振荡的振幅则愈来愈小，甚至很难振荡，于是操场中许多小孩秋千荡得很高，他们之间同位相，也与教师口令同位相，而另外许多小孩的秋千基本上是完全不能振荡，甚至他们不断地蹲下和站起来都不会有任何效果。

充满操场的无规振荡秋千与腔内的真空噪声非常相似。真空噪声可以考虑为由许多波组成，它们具有相同频率但振幅和位相是无规变化的。当所有的波叠加在一起时，产生真空噪声波。构成腔内真空噪声的许多波类似于在操场上振荡的秋千，而振动的腔镜作用类似于发出口令的教师。振动反射镜放大对它具有确定位相的那些波，而具有与此反相另外一些波则被衰减，最终在腔内的噪声将由许多相对高振幅的波和另外许多极低振幅的波所组成。这样组成的波称为压缩态，即是真空噪声在反相部分被压缩，在同相部分增加了。压缩真空噪声是完全不同于一般的噪声的，一般噪声的起伏范围是不变的，而在压缩态中噪声大小是周期地增大和减小。为了对此情况作一点解释，首先我们考虑组合波中的一个波，在波振动的一个周期中电场强度由零增大到某个极大值，然后返回到零，尔后再继续下降到负极大值，最后再返回零，于是在波的一个振荡周期中有两个

瞬时,场强是为零的。在压缩态中构成噪声的波是完全近似同相的,就是说它们几乎同时通过零,这意味着在腔中很低的场强将周期地出现(差不多没有电磁噪声),在两次出现最低场强的时间间隔中,当所有波同时达到正极大或负极大时,场强将是很高。因此,压缩态是由非常低噪声和很高噪声交替出现所组成。

在实际情况中我们不能要求镜子振动达到光频的数量级,所以在实验上要实现压缩态,需要设想一种方法去代替振动镜子所引起的周期性改变腔长的作用。美国贝尔实验室的 Slusher 研究小组并不真正地去改变腔长,而是在腔中放入充满钠原子蒸气的容器,用来改变腔的有效光学长度——在钠原子气体中光速比真空中低,也就是光通过钠原子气体的光学路径较长。当用激光去激发钠原子时,通过钠原子气体的光波将会发生快慢变化,因为光波通过激发的钠原子时只有较少能量被钠原子暂时借用,光波能较快越过,反之光波通过未激发的钠原子时就比较慢,因此激光能引起钠原子蒸气室的光学长度的迅速变化,进而影响腔的光学长度迅速改变。1985年,Slusher 研究小组利用形成驻波场的激光去周期性地激发在钠原子蒸气盒中的钠原子,并使驻波的频率精确为希望被压缩噪声频率的两倍,最后获得压缩噪声较真空噪声下降7%的结果,这是在实验上首次观察到压缩光。接着美国 IBM 的 Almaden 研究中心 Shelby,麻省理工学院的 Kumar, Shapiro 等人利用不同方法得到光场压缩态。特别值得提出的是德克萨斯大学的 J. Kimble (现在加州理工学院)和吴令安(现在中国科学院物理研究所)等人取得的令人鼓舞的进展^[2],他们利用环形稳频激光器进行内腔倍频,以倍频光作为光参量振荡器的泵浦光,得到噪声水平较真空噪声水平下降近70%的压缩光,这是目前世界上获得最大压缩量的单模压缩态。

二、压缩光的几何表示

我们在前面用浅显的比喻讲述了压缩光产

生的机理,在此基础上我们将用较为严格的描述来介绍压缩光的几何表示。

压缩光是非经典光,不能用经典理论来描写它。从量子力学的观点来考察处于光腔中的电磁场,它可以认为是由许多量子力学简谐振子组成,电场算符 $\hat{E}(t) = E_0 [\hat{x} \cos(\omega t) + \hat{p} \sin(\omega t)]$ 描述了在一给定位置角频率为 ω 的单模场。此处算符是希尔伯特空间的算符; E_0 是常数;正交场算符 \hat{x} 和 \hat{p} 类似于力学简谐振子的坐标和动量算符,它满足对易关系 $[\hat{x}, \hat{p}] = i/2$;电场的状态由满足薛定谔方程的波函数 $\psi(x)$ 描述, $|\psi(x)|^2$ 表示正交分量 \hat{x} 的观察值 X 的几率密度;能量本征态 $\psi_n(x)$ 具有精确光子数 n ,模的能量取量子化值 $E_n = \hbar\omega(n + 1/2)$, $n = 0, 1, 2, \dots, n$ 是在模中的光子(量子)数, $1/2$ 表示真空(零点)起伏。

电场期望值可由 x - p 相空间中旋转相位矢量 $\alpha \exp(-i\omega t)$ 来表示,当 $t = 0$ 相位矢量初始值为 $\alpha = \langle \hat{x} \rangle + i \langle \hat{p} \rangle$, 相位矢量沿 x 轴方向投影是平均电场值。由于起伏存在,两正交分量起伏应遵守海森伯测不准原理

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{4},$$

即是说电场正交分量不能同时精确地确定,当 $\Delta x \Delta p = \frac{1}{4}$ 是最小测不准态,量值 $\Delta x = \Delta p$ 时,是相干态。理想无噪声的经典光波在相空间中是一个点,它绘出的迹是一个理想正弦电场,没有任何不确定性。图4代表相干态,它具有两个起伏范围相等正交分量。

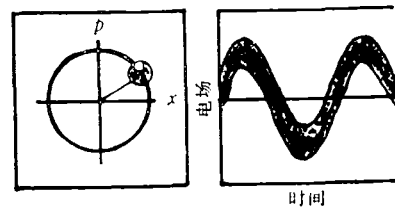


图4 相干态

$\Delta x = \Delta p = 1/2$, 此态是最接近无噪声经典光波的量子态,它在 x - p 相空间中起伏范围是以相位矢量末端为圆心的一个圆。起伏

圆中的点 (x, p) 描绘出电场迹具有不依赖于时间的起伏。对于真空态的起伏(真空噪声)为一中心在 (x, p) 相空间原点的一个圆,如图 5 所示。图 6 表示真空压缩态,它具有起伏范围在相空间为一椭圆。图 7 表示正交分量压缩的相干态,它具有起伏范围在相空间中为一椭圆,其中心位于相位矢量的末端,显然作为真空压缩态,电场的量子噪声缓慢地周期地减小和增

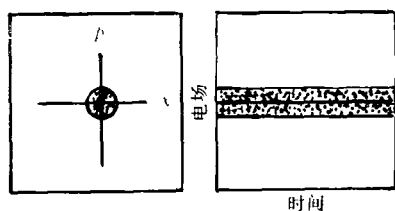


图 5 真空态

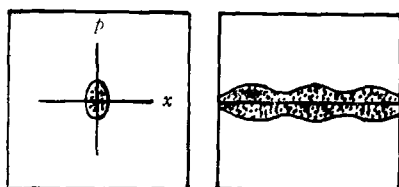


图 6 压缩真空态

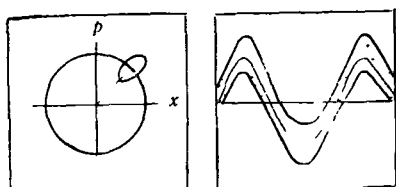


图 7 压缩相干态

强。图 6 和图 7 分别清楚地指出,在压缩真空态和压缩相干态的两正交分量不相等的噪声

(起伏),表现在电场中是周期地出现大的噪声,接着 $1/4$ 循环后出现小的噪声。

压缩光是典型的非经典光,它纯属光的量子特性,对揭示辐射场的物理本质有着重大的科学价值。同时,压缩光具有比标准量子噪声还小的起伏,因而大大地提高了光束的信噪比,可望在微弱信号检测(如引力波的测量),光通信以及原子、分子物理学等方面获得重要的应用,因此光场压缩态成为当前光学领域中最重要基础研究前沿课题之一。目前,国外在继续探索产生压缩光的各种方法及研究非经典光场有关特性的同时,已逐步开展压缩光的应用^[1],及相关领域的开拓性研究工作^[2]。国内在 1984 年开始了压缩光理论方面的研究,经过几年的努力,在非经典场的统计性质^[3]及压缩光的探测^[4]等许多方面取得了可喜的成果。国内的实验研究工作迟至 1986 年才开始,现已取得一定进展。我国科学工作者在光场压缩态这一研究领域已作了不少的工作,为我国进一步深入开展光场压缩态及有关问题的研究创造了良好的条件。

- [1] A. L. Robinson, *Science*, **233**(1986),280.
- [2] Ling-an Wu et al., *Phys.Rev.Lett.*,**57**(1986),2520.
- [3] Min Xiao et al., *Phys. Rev.Lett.*, **59**(1987), 278.
- [4] 郭光灿,量子光学,高等教育出版社,(1990).
- [5] Tan Weihan and Tan Weisi, *Optics Letters*, **14** (1989) 468.

1) S.F. Pereira et al., Presented at the Sixth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics, Rochester, New York, June 26-28 (1989).

第六届全国固体离子学术讨论会征文启事

第六届全国固体离子学术讨论会将于 1992 年 10 月底在福州召开。提交会议论文摘要的截止日期为 1992 年 3 月 30 日,提交会议论文的截止日期为 1992 年 6 月 30 日。论文限 2500 字(包括图表)。详细情况

请与福州大学化学系王文继教授联系(邮政编码为 350002)。

会议筹备组
1991 年 7 月