

光梳与光钟

李文胜

2005年10月4日,在光学领域的理论和应用方面做出卓越贡献的3位科学家荣获诺贝尔物理学奖。美国的罗伊·格劳伯因为对光学相干的量子理论的贡献而获得奖金的一半,美国约翰·霍尔和德国的特奥多尔·亨施因为对激光精密光谱学发展做出重要贡献而分享另一半奖金。

格劳伯早在1963年就通过自己先驱性的工作,提出了“相干性的量子理论”,不仅解决了一些基础性问题,而且也为一门全新的学科——量子光学的创立奠定了基础,他也因此被誉为“量子光学之父”。而霍尔和亨施则在利用激光进行超精密光谱学测量方面成就斐然,尤其是为完善“光梳”技术做出了重要贡献。我们知道精密频率测量需要的激光必须具有大量连续的振荡频率,这些振荡的频率略有不同,它们在某种条件下会发生干涉而产生非常短的脉冲,这个条件就是不同的振荡彼此锁定,通常称为锁模。下面简要介绍以下锁模的原理及锁模光场的特性。

非均匀加宽激光器都是多模振荡的。假设存在 N 个振幅相等的振荡模,即 $E_n = E_0$ 。纵模间的角频率差 $\omega_n - \omega_{n-1} = 2\pi c / (2L) = \pi c / L$,其中 L 是腔长, c 是光速。设 ω_n 和 ϕ_n 分别是第 n 个纵模的角频率和相位, ω_0 是中心纵模的角频率,则 $\omega_n = \omega_0 + n\pi c / L$ 、 $\phi_n = m\pi + \phi_0$ 、 $E_n(t) = E_0 e^{-i(\omega_0 + n\pi c / L)t + i\phi_n}$ 。 N 个纵模迭加后的总光场为

$$E(t) = \sum_n E_n(t) = E_0 \sum_n e^{-i(\omega_0 + n\pi c / L)t + i\phi_n} \quad (1)$$

在大多数激光器中,每个模的相位 ϕ_n 都随时间无规则变化,因此激光输出的总光强 $I = E^2(t) = N E_0^2$ 。如使各个模的初相相同,即令 $\phi_n = \phi_0 = 0$,用 N 个等幅矢量合成的图解法不难得出总光场为

$$E(t) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} E_0 e^{-i(\omega_0 + n\pi c / L)t + i\phi_n} \\ = E_0 \sin(N\pi c t / 2L) e^{-i\omega_0 t} / \sin(\pi c t / 2L) \quad (2)$$

(2)式表明,锁模光场是调制频率为 $\pi c / 2L$ 的调幅波。因此,多模振荡经锁模后,各振荡模发生了耦合而不再独立。由(2)式可得锁模光场的如下特性。

A. 当 $t = 2kL / c$ ($k = 0, 1, 2 \dots$)时,得到光场的峰

值为 $E_m(t) = N E_0$,其意义是光场的单峰是单一模振幅的 N 倍, N 是被锁在一起的模的数目。

B. 锁模后激光的光强为 $I(t) = E^2(t) = E_0^2 \sin^2(N\pi c t / 2L) / \sin^2(\pi c t / 2L)$,峰值光强为 $I = E_m^2 = N^2 E_0^2$,其意义是锁模脉冲的峰值光强是不锁模时光强的 N 倍,即脉冲峰值功率是不锁模平均功率的 N 倍。

C. 由(2)式可知, $E(t)$ 是周期函数,其周期为

$$T = 2L / c = 2L / C \quad (3)$$

若定义锁模脉冲的宽度为从峰值到第一个零点的时间间隔,它等于

$$\Delta t = T / N \quad (4)$$

则脉冲的空间长度 L_p 近似为

$$L_p = C \Delta t = 2L / N \quad (5)$$

因此,可将锁模脉冲视为一个能量高度集中的波包。从(5)式可知,对于给定的激光器,锁定的不同振荡越多,得到的激光脉冲就越短。 $L = 0.75$ 米的激光器要得到一个5飞秒的脉冲,大约需要锁定100万个不同频率的振荡,这需要覆盖一个相当可观的频率宽度,人们利用掺杂染料的激光介质或钛蓝宝石晶体解决了频宽问题。亨施就利用激光锁模技术和被锁模光场的特性制成高精度的激光分频器,得到了有无数尖锐而频率均匀分布的超短脉冲串。这些超短脉冲借助于铯原子钟可用来测量未知光的频率,它们仿佛是梳子上的齿或尺子上的刻度,这就是所谓的“光梳”。20世纪末,霍尔和亨施对“光梳”技术进行了有效改进,其精度目前已可达小数点后15位。使用“光梳”技术可构建更亮的激光,还可精确测量各种颜色光的频率。高精度的光梳技术还将对我们的日常生活产生巨大的影响。

时间基准的定义随科技发展而不断完善,曾采用过世界时、历书时和原子时。现在所采用的原子时的秒定义为:“秒是铯133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的9192631770个周期所持续的时间”。按此定义复现秒的精度已超过 1×10^{-13} 。

由于霍尔和亨施对“光梳”技术的有效改进,更加精确的时钟——光钟已呼之欲出。所谓光钟就是现代物理知识

利用飞秒($1 \text{ 飞秒} = 10^{-15} \text{ 秒}$)级光梳与高度稳定的光频存储技术相结合组成的计时系统。

光钟的研究是 2002 年以来国际计量科学发展的一个新热点,也是国际激光战略高技术研究领域一个新的制高点。时间频率作为一个重要的基本物理量,在国民经济、国防建设和基础科学研究中起着重要作用。第一,它是目前最准确的基本物理量,精度已达 10^{-15} 量级,许多其他物理量都可由时间频率导出。第二,它是基础物理学研究的一个重要方面,近 10 多年来的诺贝尔物理学奖中有 4 个和时间频率标准有关(1989 年的德默尔特与保罗的离子阱及拉姆齐的分离场技术,1993 年的小约瑟夫和泰勒的脉冲星稳定周期,1997 年的朱棣文、科恩-塔诺季和菲利普斯的激光冷却与捕陷原子,以及 2005 年格劳伯光学相干的量子理论和约翰·霍尔与特奥多尔·亨施的激光精密光谱学)。第三,时间频率具有良好的传递性,可用电波传播而保持很高的精度,是当代导航技术的基础,时间频率技术是 GPS 系统的关键技术基础之一。第四,它和人类社会的日常生活密切相关。正是由于时间频率具有如此重要的意义,一些发达国家的政府纷纷投巨资支持研发相关的高新技术,以求抢占或保持在该领域的领先地位。

由于飞秒级光梳的研制成功和迅速推广应用,利用冷原子或离子存储稳频的光频标准与飞秒光梳结合组成的光钟已初具雏型,使得光学频率标准的实际应用即将变成现实。2001 年,美国国家标准与技术研究所研制成功了“光学传动装置”,这种新式的“钟”比铯原子钟的精度要高 3 个量级(即 1000 倍)。目前,国内外计量界和一些著名科学家认为,光钟将成为国际新一代时间频率的基准。美国《科学》周刊在 2001 年末预测值得关注的六大热门科技领域时评述道,“由于光钟以高频不可见光波而非以微波辐射为基础,因此光钟比此前的仪器更精确”。

值得一提的是,虽然我国在光钟的研究方面起步较晚,但通过我国科学家不遗余力地攻关,已经取得了举世瞩目的成就。2003 年初,我国自行研制的首台飞秒激光光梳,应邀参加国际标准局进行的首次飞秒光梳国际比对。参加这次国际比对的飞秒光梳全世界仅有 4 台,对比结果令人十分满意,这标志着我国科学家在该前沿科技领域已处于领先地位。

国际标准局的专家认为,“具有极高精度光钟的研发,将导致现有体系的进步与精化,甚至开创物理学和科技的新领域。”利用光钟,人们将提高有赖于时间基准的所有系统的精度,如 GPS 卫星导航定位系统的定位精度、太空望远镜的观测精度等。另外,超高精度的时间基准也可能用于研究物质和反物质的关系,及检测某些自然界常数可能产生的变化。

可以预计,未来光钟的应用将对人们的日常生活产生深远的影响。

(湖北十堰市湖北汽车工业学院理学部 442002)

LHC 建设进展顺利

科苑快讯

CERN 的主任罗伯特·艾马(Robert Aymar)在 2005 年 12 月 16 日 CERN 委员会第 135 次会议上致辞时,称赞 LHC(Large Hadron Collider,大型强子对撞机)取得了重大进展。他说:“一年来,我们取得了重大进展。当然,挑战还没有结束,但是我们有足够的信心,使它能在 2007 年按期开始运行。”

LHC 是目前世界粒子物理学领域最重大的项目之一。在它上面运行的实验将研究一些令科学家们困惑的问题,包括基本粒子各自都有特定质量的原因、宇宙中的质量缺损和暗能量问题,因为宇宙中的可见物质只占宇宙总质量的 5%。物理学家们还将探究自然界中物质远多于反物质的原因,以及宇宙大爆炸后瞬间的物质组成。

LHC 曾受低温流体输送系统缺陷的影响而使整个项目出现拖延,但这次拖延损失的时间都已得到弥补。低温系统目前性能卓越,LHC 磁铁的安装也很迅速。在 1232 块磁铁中,有 1000 块已运抵 CERN,超过 200 块磁铁已在 LHC 的地下隧道中安装完毕。

目前的安装速度是平均每星期 20 块,但是要想实现 LHC 在 2007 年开始运行的目标,还需把速度提高到平均每星期 25 块。2006 年春季的建设计划已草拟完毕。

艾马还告诉与会代表,CERN 的来宾和网络中心——球形科学创新中心(Globe of Science and Innovation)已于 2005 年 9 月投入使用,中心计划在 2007 年 LHC 开始运行时,同时举办介绍 CERN 科学研究工作的永久性展览。

(高凌云译自 CERN Courier,2006 年第 1 期)