

2005 年诺贝尔物理学奖与光学频率梳*

魏志义†

(北京凝聚态物理国家实验室 中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080)

摘要 光学频率梳是 2005 年诺贝尔物理学奖的重要内容,本文结合时间频率标准的发展历史,简要介绍了飞秒频率梳的基本原理、发明背景、科学意义及研究趋势.最后通过对该项发明的思考,浅谈了一点对科学研究方法的不成熟认识.

关键词 2005 年度诺贝尔物理学奖,光学频率梳,飞秒激光脉冲

The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques

WEI Zhi-Yi†

(Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The development of optical frequency comb technique greatly pushed the revolutionary progress in laser-based precision spectroscopy, which shared the 2005 Nobel prize in physics. Following the history of time-frequency standard, the basic principle and background of optical frequency comb techniques are reviewed in this paper, the applications and the latest research activities are also briefly introduced. Finally, based on the analysis on the inventive work, I give some simple comments on the style of scientific research.

Keywords 2005 Nobel prize in physics, optical frequency comb, femtosecond laser pulse

2005 年诺贝尔奖的评选与授奖活动已落下帷幕,三名科学家由于在与光学相关的研究领域所做出的杰出成就而获物理学奖的殊荣,其中美国哈佛大学的格劳伯教授(R. J. Glauber)因对“光相干性的量子理论”的贡献而分享该奖的一半,另一半由美国国家标准技术研究院(NIST)的霍尔教授(J. L. Hall)和德国马普量子光学所(MPQ)的亨施教授(T. W. Hänsch)共同获得,以奖励他俩对“超精细激光光谱学,包括光学频率梳技术”的贡献.作为该年度物理学奖的重要内容,光学频率梳对许多人而言也许是一个新名词,那么其究竟表达了一种什么样的物理概念?在该项诺贝尔奖中起着什么样的作用?本文从笔者粗浅的理解角度,简单介绍光学频率梳的出现、发展以及重要应用.

1 引言

我们知道,时间作为一个基本的计量单位,日常生活中每个人都会不可避免地与其打交道,这样自然就涉及到时间计量的精度和准确性的问题.早在 1000 年多年前,我们的祖先就发明了世界上最早的时间计量设备——水钟,但直到 17 世纪前后,由于航海活动的需要,人们才对计时精度的重要性有了初步的认识.随着现代科学的形成和发展,时间的精密计量也被赋予了新的科学内容,一方面新的技术被用于高精度的时间计量中,另一方面精确的时间量对基础科学的发展起着重要的推动作用.基于原子跃迁的同一性,1967 年在第 13 届计量大会上人

* 国家自然科学基金(批准号:60490280,60225005,10227401)资助项目

2006-02-26 收到

† Email: zywei@aphy.iphy.ac.cn

们将时间单位“秒”定义为“铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的9 192 631 770个周期的持续时间”^[1],并一直沿用至今.这一定义下的时间精度达到了 10^{-15} 的量级,也是目前所有物理量中最精确的基本单位.由于时间与频率互为倒数关系,因此在涉及频率的大量科学研究和技术应用领域,如超精细光谱学、全球定位系统(GPS)、空天飞行、精密制导、无线通讯等方面,高精度的频率时间基准起着核心作用.可以说以微波原子钟为基础的时间频率标准,构成了现代科学技术大厦的基石,而科学技术研究的不断发展,对时间频率的基准又提出了更高的要求.为了进一步提高其精度,早在激光诞生后不久,人们就想到采用光学频率代替微波钟作为新的时间基准的可能性,从原理上讲,由于光频的频率在数百THz量级,比GHz的微波频率高多个量级,因此原理上采用光钟可望得到优于 10^{-18} 的准确性,这无疑会大大提高GPS、深空导航、基本物理常数测量等内容的精度.但一个巨大的障碍是如何高精度地实现微波频率与光学频率的连接,多年来一直是制约该项研究的主要瓶颈.

2 光学频率梳的原理和发展背景

为了实现微波频率与光学频率的连接,人们很早就提出了频率链的方案,其主要思想是通过非线性频率变换等手段,将光学频率变换到微波频率.由于这种方案复杂的技术过程和低的非线性效率,科学家们经过十多年的艰苦努力,直到20世纪末才建成这样的装置^[2].但是,频率链庞大的体积结构及多次转化所形成的积累误差,决定了用其测量光频的复杂性和不确定性.20世纪70年代,在美国斯坦福大学的德国科学家亨施及其同事率先提出了用超短激光脉冲作为桥梁连接微波频率和光学频率的可能性^[3],并利用同步抽运染料激光所产生的皮秒激光脉冲,实现了500GHz的光学频率梳.在此前后,前苏联科学家契包塔耶夫(Chebotayev)等人也提出了类似的概念^[4],并在1991年讨论了早期的频率梳技术^[5],但由于1992年契包塔耶夫去世,影响了这些活动的继续开展.为了了解光学频率梳的物理本质,这里我们不妨先认识一下激光谐振腔中的纵模分布.根据激光的基本原理,对于一个腔长为 L 的谐振腔,在所输出的光谱范围内存在着大量等间隔的纵模,相邻纵模的频率间距 $F = c/2L$,这里 c 是光速.这样在单位为 F 的参考数轴上,接近第 n

个坐标的纵模,其绝对频率可以表示为

$$f(n) = nF + \delta, \quad (1)$$

如图1所示,这里 n 是整数, δ 是该纵模偏离对应坐标的频率偏差,并有 $\delta < F$.由于激光脉冲的重复频率 F 通常在100MHz左右,正好属于微波频率的范围,因此如果将 F 及 δ 分别锁定到目前的微波原子钟,也就实现了激光频率 f 与微波频率的固定连接.图2表示了光学频率与微波频率的这种连接关系^[6],一个常用的方案就是将 F 及 δ 锁定到铯原子钟.不难理解,这些激光纵模一经锁定后,其将保持固定的位置,相当于频率间隔相等的梳子一样,故而将其称之为频率梳,图2的上面同时列出了目前使用的几种典型光频标的频率位置.根据傅立叶变换关系,超短激光脉冲的宽度越窄,其对应的光谱也就越宽,这样存在的纵模数也就越多.在20世纪70年代,人们所能产生的超短激光脉冲的宽度主要在皮秒(ps, 10^{-12} 秒)量级,对应的光谱宽度极其有限,因此在图2的频率图上仅覆盖很窄的范围,这样要测出频率偏差 δ ,从而通过对其与重复频率 F 的锁定而实现微波与光学频率之间的稳定连接是极其困难的.直到90年代中后期,由于固体飞秒(fs, 10^{-15} 秒)激光技术的快速发展,才为取得这一突破提供了可能.

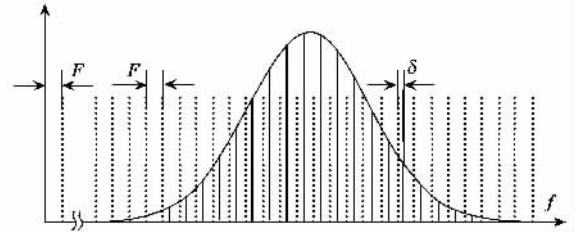


图1 激光光谱内由谐振腔腔长决定间隔的纵模图(其中虚线是以重复频率 F 为单位的参考数轴, δ 是纵模与参考数轴之间的偏差)

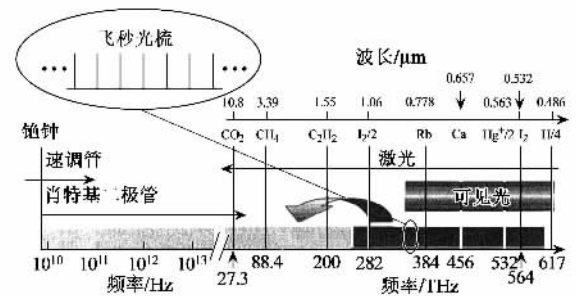


图2 原子及分子光钟的电磁谱图(通过锁定放大图中的频率间隔与偏置频率量,可以实现其与微波频标的连接)^[6]

1996年,利用掺钕蓝宝石激光器所产生的飞秒激光脉冲,人们不仅通过标准光纤能将重复频率MHz

量级的飞秒激光展宽到大于一个倍频程,即同时包含有基波波长与倍频波长的超宽光谱,而且利用色散补偿技术将脉冲宽度压缩到了 $5\text{fs}^{[7]}$ 。在这样短的时间内,根据光传输距离与时间的关系 $\tau = \lambda/c$, 800nm 载波波长的激光所能振荡的时间还不到2个光周期。对于这样短的激光脉冲,一个需要认真考虑的问题是其载波与脉冲包络之间的相位(carrier envelope phase, CEP)变化情况。就在这一年,时在维也纳技术大学访问研究的中国科学院西安光机所青年学者许林与亨施教授等人在《光学快报》(Optics Letter)上首次发表了探讨这一问题的经典论文^[8]。图3表示了对于一个不到两个光周期的超短激光脉冲,其载波与包络之间的相对变化情况。由于激光腔内通常群速度色散与相速度色散的不同,激光每在腔内传输一次,其载波与包络之间就会产生一个相对的相移 $\Delta\phi$,在频率域,相当于整体纵模移动了 δ 的频率,并且两者之间存在着 $\delta = 2\pi\Delta\phi/F$ 的关系。因此,对相移 $\Delta\phi$ 的测量与控制,也就等价于对频率偏差 δ 的测量与控制。超快激光技术及精密计量均面临的一个重大课题,不约而同地变成了同一件事。三年之后,亨施的研究组在对上述关系进一步分析的基础之上,将飞秒钛宝石锁模激光用于光学频率的测量。但是,由于他们所能获得的光谱宽度不够一个倍频程,不能实现对 CEP,亦即 δ 的测量,因而成为他们的一种遗憾。就在此后不久,美国贝尔实验室等研究机构成功地生长出了光子晶体光纤(PCF)^[9],并为霍尔教授的研究组率先采用。由于 PCF 的特殊性能,人们用其可以方便地将飞秒激光的光谱展宽到一个倍频程以上^[10],这样经差拍光谱长波部分的倍频光与光谱的短波部分,即可以测量到 δ 。图4为测量 δ 的原理示意图,由 PCF 输出的超连续光谱经分束镜分为高频与低频两部分,其高频部分可表述为 $f(2n) = 2nF + \delta$,而低频部分经倍频后,其频率则为 $2f(n) = 2nF + 2\delta$ 。当这两束光经延时控制再次重合后,即可通过拍频 $2f(n) - f(2n) = \delta$ 而测得频率偏 δ 。霍尔等人正是采用这一所谓的自参考技术,通过高精度的电子伺服反馈系统锁定 δ 及重复频率 F ,第一次实现了光学频率 f 与微波频率的直接连接,并且用其成功地测量了 778nm 连续波钛宝石激光的精确波长^[11]。图5为霍尔等人的频率梳实验结构图,可以看出高稳定的飞秒激光器及高精度的电路控制系统,构成了频率梳的核心内容。目前这样的装置已有产品,并可集成在约 0.5m^2 的尺度内(图6)。

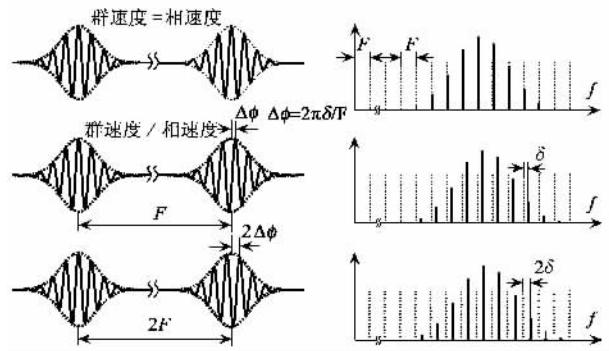


图3 飞秒激光脉冲的载波包络相移与纵模频率偏差的对应关系

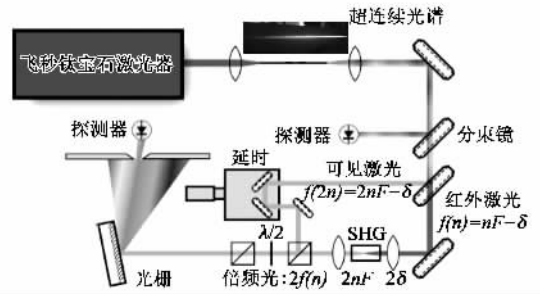


图4 自参考技术测量频率偏差量 δ 的实验示意图

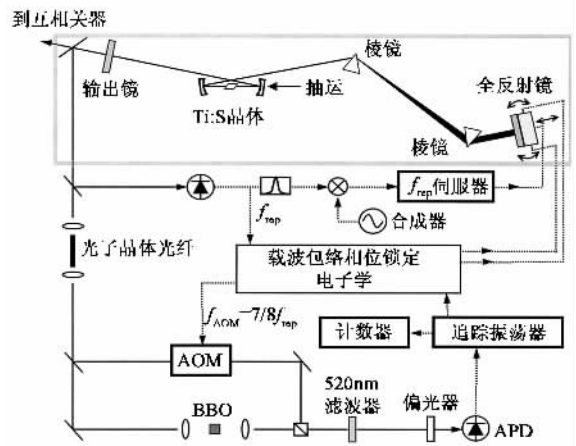


图5 典型飞秒激光频率梳的光路与电路示意图^[11](BBO: 偏硼酸钡晶体;APD:雪崩光电二极管)

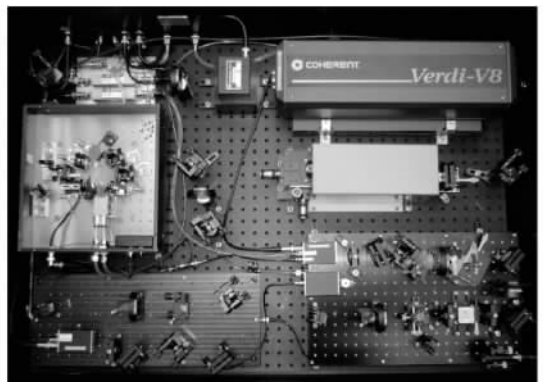


图6 飞秒激光频率梳的结构图(引自亨施的报告)

3 光学频率梳的科学意义及最新进展

正是由于光学频率梳的发明,才使得人们第一次能够用微波频标直接测量光学频标,并进而为发展更高精度的下一代光钟、实现用光学频标标定微波频标提供了可能。这一重大突破不仅被广泛认为是频率测量历史上具有革命性意义的进展,而且也促进了激光精密光谱学、阿秒($as, 10^{-18}$ 秒)激光物理等学科的发展,在基本物理常数的精确测量、GPS精度的进一步提高等方面有着重要的应用。但是,作为精密测量的新工具,如何保证频率梳的精度与可靠性,是一个非常重要的问题。2003年,华东师范大学的马龙生等人利用在NIST及法国BIPM工作的便利条件,进行了三台飞秒频率梳的国际比对,证明了高达 10^{-19} 的不确定度^[12]。但另一方面,基于PCF的这种光学频率梳由于PCF的漂移、损坏及低透过率等问题,在可靠性方面存在着先天的不足,而且控制频率偏差 δ 还需要复杂的精密电子学技术支持。针对这一问题,MPQ及NIST的科学家巧妙地提出了利用宽带激光的两端光谱相互差频而产生自动相干锁定的频率梳方案^[13,14]。根据(1)式,一个宽带光谱中每一个纵模均有相同的 δ ,这样高频与低频相减后,由于 δ 的相互抵消,新出现的差频光谱中的纵模将不再有频率偏差,这样只要锁定重复频率,即可实现高稳定度的频率梳。目前这种方法已开始得到普遍使用,作为新技术的关键,不再是PCF,而是可高效率产生差频的准相位匹配晶体(PP-MgO:LN)。

频率梳最近的另一个重要进展是向紫外及极紫外的扩展。2005年NIST的叶军小组(原霍尔小组)及MPQ的亨施小组几乎同时报告了利用共振增强飞秒激光产生气体高次谐波而实现极紫外频率梳的研究^[15,16]。其主要的技术方案是将锁模掺钛蓝宝石激光输出的飞秒脉冲通过耦合镜注入另一重复频率完全匹配的环形腔中,通过在该腔焦点处的真空室中喷入惰性气体,从而激发高次谐波。对于高次谐波的产生来讲,驱动激光必须要有足够高的聚焦功率密度,由于振荡器输出的激光单脉冲能量较低,因此共振增强腔的设计和调试是一个关键的问题,通常必须要有大于 $10^{13} W/cm^2$ 的聚焦功率密度。实际上,人们用kHz重复频率的飞秒放大激光早就作出了类似的工作^[17],但对于实际的频率梳而言,重复频率通常需要在100MHz以上。NIST和MPQ的研究正是采用了100MHz量级的重复频率,因此能够很好地作为极紫外波段的频率梳,在计量测量中将有

更高的精度。目前用上述方法所产生的频率梳的波长已到了50nm。

4 光学频率梳带给我们的启示

追求精度更高、结构更实用、功能更丰富的光学频率梳仍是不断发展中的课题。频率梳成为诺贝尔物理学奖的重要内容,同时也给我们很多启示:首先告诉我们,科学创新的机会往往蕴藏在不同学科之间的相互交叉中,本来飞秒激光与频率测量是两个不同的研究内容,正是亨施等人巧妙地将飞秒激光用于频率测量中,才有了频率梳这一概念。美国科学家泽维尔因飞秒激光用于化学反应动力学的研究而获1999年诺贝尔化学奖,也是学科交叉的另一个成功事例。第二,科学创新需要一种相应的文化,面广的基础知识和善于思考的头脑是取得科学创新的重要条件。频率梳实际上是一个比较简单的基本概念,从上面的介绍我们可以看出其并非晦涩难懂,但现实中我们多是顺着计划好的研究目标而开展工作,很少能有意识的去思考发掘一些新的东西。亨施等人的不同就是能够以其敏锐的思维,在既定的研究中看到新的突破所在。笔者虽然早在1996年与国外同事用腔倒空的飞秒激光振荡器产生了宽于一个倍频程的超连续光谱^[7],但遗憾的是由于知识所限,未能认识到其在激光稳频中的革命性应用。一个好的科研氛围,是科研人员要有充足的时间去吸收新鲜的知识营养,并能不断的思考探索问题,而不是将大部分时间用于按部就班地去完成一些程序、填写许多急于体现成果的表格和报告。第三,重大成果的取得离不开必要的研究积累和先进的技术支持,从20世纪60年代起,霍尔和亨施等人就投身于频率精密控制与计量的研究,面对诸如频率链等复杂而进展缓慢的工作,他们并没有放弃,而是在政府的支持下,持续努力。在中国当时的条件下,这样的工作可能会面临许多问题。亨施在获得诺贝尔奖后,也曾感慨:这是一个简单的思想,为什么用了这么长的时间才实现!答案实际上是技术的制约。1999年,得益于飞秒激光技术的重要发展和超连续光谱的实现,霍尔的研究组率先第一个在实验上实现了飞秒频率梳,从而为精密计量学翻开了新的一页。第四,提出新的思想和方案,比取得什么样的先进成果、打破什么样的纪录更为重要,因为后者只是对前人工作的延续和推进,而前者才是科学原创工作的体现。纵观诺贝尔物理学奖的历史,基本上都是授予那些作出原创贡献的科学家。此外,科学家归属祖国,也会使得其



图7 年青的亨施 1980 年访华时与邓小平的合影照片(2004 年笔者访德时由其提供复制)

荣誉更加浓厚. 笔者 2004 年有幸受亨施接待访问其在慕尼黑技术大学及 MPQ 的实验室, 并与其合影留念, 交谈中得知他是 1986 年从美国斯坦福大学回到德国的, 1980 年访问过中国, 并特别自豪地说见过邓小平(图 7). 根据其经历, 虽然提出光学频率梳的工作时间在美国, 但后续的研究主要是在德国取得的. 在最近 20 年的历史上, 亨施也是唯一一个获诺贝尔奖时在德国的德国人, 因此 2005 年物理学奖公布后, 令德国人振奋不已. 目前, 中国科学院倡导和推进的知识创新工程和创新文化建设, 应该说从根本上认识到了我国以前科研体制上的弊端所在, 特别是政府许多政策的出台, 吸引了一批像亨施一样有成就的归国学者, 因此我们有理由相信, 经过若干年的积累和我国科研人员的勤奋努力, 将会诞生中国本土的诺贝尔物理学奖. 需要指出的是, 诺贝尔奖在某种程度上也是对一项研究成果的奖励, 因为除了作为代表人物

的获奖者本人以外, 也包含在本年度诺贝尔物理学奖的贡献中, 闪烁着不少在海外工作和工作过的华人身影.

参 考 文 献

- [1] Bergquist J C , Jefferts S R , Wineland D J. *Physics Today* , 2001(3) 37
- [2] Schnatz H , Lippard B , Hellmcke J *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1996 , 76 : 18
- [3] Eckstein J N , Ferguson A I , Häsch T W. *Phys. Rev. Lett.* , 1978 , 40 : 847
- [4] Baklanov Ye V , Chebotayev V P. *App. Phys. A* , 1977 , 12 : 97
- [5] Bagayev S N , Chebotayev V P , Klementyev V M *et al.* In : *Proc. 10 th ICOLS , Frnt - Romeu. Heidelberg : Springer* , 1991. 91 ; *Laser Physics* , 1994 , 4 : 293
- [6] Cundiff S T , Ye J , Hall J L. *Rev. Sci. Instrum.* , 2001 , 72 : 3754
- [7] Baltuska A , Wei Z , Pshenichnikov M S *et al.* *Opt. Lett.* , 1997 , 22 : 102
- [8] Xu L , Spielmann C , Poppe A *et al.* *Opt. Lett.* , 1996 , 21 : 2008
- [9] Ranka J K , Windeler R S , Stentz A J. *Opt. Lett.* , 2000 , 25 : 25
- [10] 赵玲慧, 魏志义. *物理* , 2004 , 33(5) 335 [Zhao L H , Wei Z Y. *Wuli(physics)* 2004 , 33(5) 335 (in Chinese)]
- [11] Jones D J *et al.* *Science* , 2000 , 288 : 635
- [12] Ma L S *et al.* *Science* , 2004 , 303 : 1843
- [13] Zimmermann M , Gohle C , Holzwarth R *et al.* *Opt. Lett.* , 2004 , 29 : 310
- [14] Fuji T , Apolonski A , Krausz F. *Opt. Lett.* , 2004 , 29 : 632
- [15] Jones R J , Moll K D , Thorpe M J *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 94 : 193201
- [16] Gohle Ch *et al.* *Nature* , 2005 , 436 : 234
- [17] Baltuska A *et al.* *Nature* , 2003 , 421 : 611

· 中国物理学会通讯 ·

关于推荐评选第六届“周培源物理奖”的通知

第六届“周培源物理奖”的推荐评选工作已经开始, 请按此通知的要求, 认真、严格组织推荐, 并准时上报.

一、第六届(2006—2007 年)“周培源物理奖”的推荐和评选工作, 依照 1997 年 1 月 29 日中国物理学会常务理事会通过的“周培源物理奖”奖励条例进行.

二、受周培源基金会的委托, 中国物理学会设立了“周培源物理奖评审委员会”. 该委员会负责经过初审后的请奖项目的评定工作.

三、依照奖励条例, 推荐并经过初审的请奖项目的有关材料应在 2006 年 10 月 30 日前(以当地邮戳为准)报送中国物理学会办公室. 报送材料包括申请书、专家推荐表、单位推荐意见和主要论文等, 各 12 份.

通信地址: 北京 603 信箱 中国物理学会办公室

邮编: 100080 电话/传真: 010-82649019 联系人: 谷冬梅

中国物理学会

周培源物理奖评审委员会

注: 奖励条例、评审委员会名单、申请书、单位推荐意见、专家推荐表等请查阅中国物理学会网站 www.cps-net.org.cn.