

光钟*

马龙生[†]

(华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室 上海 200062)

摘要 时间标准的研究在人类生活和科学探索中有着举足轻重的地位. 文章简要介绍了时间的基本单位“秒”定义的几次重要发展与变迁, 重点介绍了光钟的工作原理、关键部件、研究进展和光钟对“秒”定义未来发展的重要性.

关键词 光钟, 时间/频率标准, 飞秒光梳

Optical clock

MA Long-Sheng[†]

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract Time standards have played a most important role in both human society and in the exploration of new science. In this article, the evolution of the definition of the “second” is briefly reviewed. Emphasis will be placed upon the working principle and key components of the optical clock, recent progress, and the future definition of the second based on the optical clock.

Keywords optical clock, time and frequency standard, femtosecond laser frequency comb

1 光钟的由来

时间和授时系统是人类文明发展中的一个重要组成部分, 很难想象如果没有了钟、手表或者手机来告诉我们时间, 我们的生活将会怎样?

在人类文明历史上, 时间往往只是同地球的自转联系在一起. 直到 1928 年, 才有了明确的时间定义. 那一年, 国际天文学协会(the International Astronomical Union)推荐由天文年鉴来确定时间, 称为“世界时”, 而对于时间的基本单位“秒”的国际定义当时还没有, 直到 20 年后才形成.

20 世纪 50 年代, 1 秒被定义为 1 个平均太阳日的 $1/86\,400$. 然而, 由于太阳日在一年中并非完全相同, 所以在 1956 年该国际单位制“秒”被修改成 1900 年 1 月 1 日 12 时开始地球公转一周时间的 $1/31\,556\,925.9747$. 该定义在 1960 年的第 11 届国际计量大会(the General Conference on Weights and Measure, CGPM)上被批准通过.

由于原子物理的发展, 科学家们已经认识到那些未受干扰的原子的量子能级跃迁可以提供近乎完美的时间标准, 其非常尖锐的共振跃迁可以用作为频率参考基准, 用该方法建立的“秒”定义具有很多

优点. 经过多年努力, “秒”终于脱离了地球物理学的范畴, 在 1967 年的第 13 届国际计量大会上, 第一次由原子时间来定义“秒”, 即铯原子 133 同位素基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射周期的 $9\,192\,631\,770$ 倍的时间. 由于其跃迁频率在微波波段, 因此, 利用微波跃迁频率建立起来的时间/频率标准有时称为“微波钟”, 我们现行的秒定义就是基于该跃迁的“微波钟”.

时间/频率标准的研究在科学探索中有着举足轻重的地位. 从 20 世纪 40 年代以来, 有近十次诺贝尔奖颁发给了那些对时间/频率标准研究作出重要贡献的科学家. 最近, 霍尔(John L. Hall)和亨施(Theodor W. Hansch)由于他们在精密激光光谱研究和光学频率梳技术方面的重要贡献而获得了 2005 年的诺贝尔物理学奖, 他们的工作为实现光钟奠定了基础^[1,2]. 所谓光钟, 就是利用原子在光波波段的跃迁来定义的时间/频率标准.

* 国家自然科学基金(批准号: 60490280)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB805005)资助项目;上海市科委重大项目(批准号: 04DZ14009),上海市科委重点项目(批准号: 07JC14019)

2008-07-27 收到

[†] Email: lsma@phy.ecnu.edu.cn

基于原子跃迁的时间/频率标准的稳定度和精度与下式有关:

$$\sigma(\tau) \sim \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N} \sqrt{\tau}},$$

其中 $\Delta\nu$ 和 ν_0 分别是原子跃迁的线宽和中心频率, N 是与电磁场相互作用的原子个数, τ 是测量时间. 由于光学频率($\nu_0 \sim 10^{14} - 10^{15}$ Hz)比微波频率($\nu_0 \sim 10^9 - 10^{10}$ Hz)高出 4—5 个数量级, 因此根据该公式可知, 在相同跃迁谱线宽度的条件下, 光学频率标准的精度和稳定度要比微波频率标准好得多.

科学家们已在光学频率波段发现有些原子跃迁的线宽非常窄, 可以达到亚赫兹、甚至毫赫兹量级. 因此可以预期光钟的精度将大大优于微波钟, 可达到 $10^{-17} - 10^{-18}$, 所以科学家们一直期盼着建成光钟.

有了如此高精度的时间频率标准, 将会进一步改进 SI 国际单位制体系. 科学家们可以在更高的精度上测量物理常数、探索物理常数的变化以及验证基本物理理论, 可以预期光钟在卫星通讯和全球定位系统中将有着广泛的应用前景.

同所有的钟一样, 光钟也有两个基本组成部分: 振荡器和计数器. 1999 年, 飞秒激光频率梳的开创性的发展为光钟提供了一个非常好的“光学齿轮”, 它可以精确地将光频的精度传递到微波波段, 从而实现记录和显示, 这为光钟的建立迈出了重要一步.

在过去的几年中, 世界上许多计量实验室已利用光梳技术对几种原子的光钟跃迁频率进行了精确测量. 值得注意的是, 在 2006 年召开的国际计量委员会(CIPM)会议上, 第一次确定了 4 个原子或者离子的光学跃迁频率(Hg^+ , Sr^+ , Yb^+ 和 Sr)作为国际单位制“秒”定义的二级标准, 它意味着光钟将有很好的发展前景.

2 光钟的原理和结构

光钟的原理如图 1 所示. 在光钟中, 可调谐稳频激光器输出的激光线宽在亚赫兹量级. 如果将其输出频率 ν 精确地在原子钟的跃迁频率附近调谐, 可以确定原子钟跃迁的中心频率 ν_0 . 然后通过伺服控制系统, 控制激光的频率 ν , 使 $\nu = \nu_0$, 即得到一个受原子跃迁校准的振荡器. 然后, 将光学频率 ν_0 精确地分频到微波波段进行计数. 在分频过程中, 要使微波频率与光波频率具有同样的精度和稳定性.

光钟的结构如图 2 所示. 利用光晶格或者离子

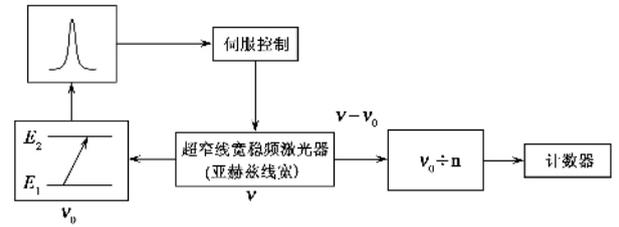


图 1 光钟的原理图(激光频率 ν 锁定在原子跃迁频率 ν_0 上, 然后被精确地分频到微波波段进行计数)

阱来囚禁冷原子或者离子, 使原子或离子隔离起来, 不受相互碰撞及外界环境的干扰. 由于原子在光晶格中移动的范围小于光波长, 大大降低了多普勒频移. 另一个光钟关键技术是使用“魔术”波长来构成光晶格, 它的作用是使原子钟跃迁的基态和激发态的交流 Stark 频移相同, 最终使原子钟跃迁频率保持精确不变^[3]. 理论计算表明, 使用“魔术”波长来构成光晶格光钟, 它的频移可以减小到 $10^{-17} - 10^{-18}$. 同时, 科学家们还在研究如何建立分子光钟.

为了探测原子非常窄的跃迁谱线, 需要一个亚赫兹量级线宽的超稳激光源. 压缩激光线宽是通过伺服系统将激光频率锁定到高精度度的光学谐振腔上来实现, 该光学谐振腔被放置在温度极其稳定、环境噪声极小的环境下.

将超窄线宽的超稳激光传送至冷原子系统进行探测时, 最方便的办法就是光纤传输. 然而当光在光纤中传输时, 环境噪声会导致激光的线宽增宽. 科学家们为了解决这一问题, 研究了消除光纤传输相位噪声的有效办法. 目前所采用的技术已经可以将这些光纤相位噪声引起的额外线宽压缩到毫赫兹量级, 这足以用来传输光钟装置中的超窄线宽稳频激光^[4].

当窄线宽激光与原子的钟跃迁能级共振时, 用伺服系统将它的频率锁定在原子的钟跃迁频率上, 使得该激光的频率既精确又稳定, 此时, 激光就是光钟中的振荡器.

为了将这个单一频率激光的相干性、稳定性和精确度传递到其他光波段和可计数的微波波段, 需要一个精度非常高的“光学齿轮”, 飞秒激光频率梳是一个理想的“光学齿轮”. 光钟结构如图 2 所示, 它可将频率为 f_L 的激光与光梳中频率接近的一个光谱成分 f_n 拍频, 得到拍频频率 $f_b = f_L - f_n = f_L - n f_{\text{rep}} - f_0$. 微波锁相技术可以严格控制拍频频率 f_b 和光梳的零频 f_0 , 由此光梳的重复频率 $f_{\text{rep}} = (f_L - f_b - f_0) / n$, 其中 n 是一个整数, 在 $10^4 - 10^5$ 范围 f_L 是

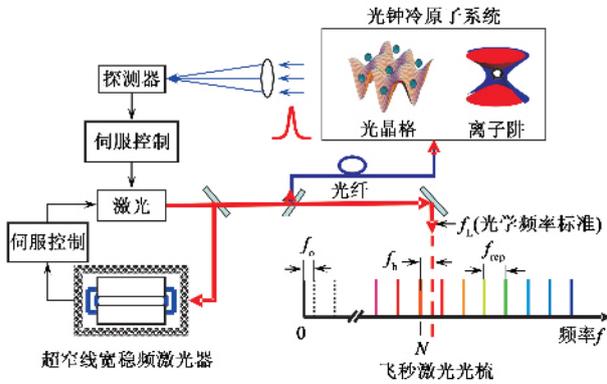


图2 光钟结构图(激光频率锁定在高度隔离的光学谐振腔上,实现激光线宽的压窄,然后将其频率锁定在原子跃迁的中心频率处.通过飞秒激光频率梳,将该稳频激光的频率稳定性和精确度传递到其他光波或者微波波段)

光学频率在 $10^{14}—10^{15}$ Hz 范围 f_b 和 f_0 远小于 f_L , 在 $10^7—10^9$ Hz 范围,并有非常高的控制精度,所以 f_{rep} 的稳定度和精确度主要是由激光频率 f_L 决定,从而实现了光学频率向微波频率的精确传递。

3 光钟研究的最新进展

2001年,科学家们用原子和飞秒激光频率梳完成了第一个“光钟”试验^[5]。在光钟中,飞秒光梳锁定在光学频率标准上,而不是微波标准上,使飞秒光梳具有光学频率标准的稳定度和精确度。那时,美国国家标准与技术研究所(NIST),用飞秒激光频率梳对冷Ca原子钟和Hg离子光钟的频率进行了比对研究,结果显示,它们相对频率的不稳定度小于 1×10^{-15} (几百秒积分时间),但是还没能达到 1×10^{-17} 。

为了验证这次比对的结果并非受到飞秒光梳本身不确定度的限制,2003年由3个不同实验室(美国国家标准与技术研究所、设在法国的国际计量局和中国的华东师范大学)研制的两种不同类型,共计四台光梳在美国NIST进行了比对研究。结果表明,当光梳受控于光学频率标准时,光梳频率的一致性可达到 10^{-19} 水平^[6],因此光梳作为“光学齿轮”可以满足光钟研究的需要。

最近,科学家们又发展了一种新的技术——光纤飞秒激光频率梳。虽然它的相位噪声比钛宝石飞秒激光频率梳的相对大一些,但是它结构紧凑且简单,可靠且实用,因此它也有着广泛的应用前景。近几年来,德国物理技术研究所(PTB)对两台掺钕飞秒激光频率梳进行了比对研究,美国国家标准与技

术研究所还对掺铒光纤飞秒激光频率梳和钛宝石飞秒激光频率梳进行了比对研究^[7],最近美国科罗拉多大学的JILA研究所还对掺镜光纤飞秒激光频率梳和钛宝石飞秒激光频率梳进行了比对研究^[8]。这些研究表明,光纤激光频率梳在光钟研究中将是一个很好的频率转换器件。

上面提到,超窄线宽激光器是光钟中不可缺少的一部分。1999年,美国国家标准与技术研究所将激光的频率锁定在一个高度隔离、超高精度的法布里——珀罗腔的谐振频率上,实现将激光的线宽压缩到亚赫兹量级^[9]。该光学谐振腔用具有超低热膨胀系数的材料制成,它的两个腔镜用光胶的办法分别粘在腔体的两端,并且在实验中整个光学谐振腔被放置在一个温度恒定的真空室内,而整个真空室又用几根长为3m的橡皮拉力带垂直吊起,其目的是隔离外界振动对光学谐振腔长度的影响。

美国国家标准与技术研究所的科学家们用 Pound - Drever - Hall 锁定技术^[10]锁定了两台独立的激光器,将其线宽压缩至亚赫兹,并利用该窄线宽激光器探测 Hg^+ 的一条窄线宽跃迁,其跃迁频率在 1.06×10^{15} Hz。在过去多年的研究中,NIST科学家们已用基于铯原子微波频率标准的光频率梳来测量其跃迁频率,结果显示,其跃迁频率(1.06×10^{15} Hz)的测量精度已从10 Hz提高到1 Hz。最近又将 Al^+ 离子和 Hg^+ 离子光钟频率的比值测量的有效位数提高到17位^[11]。

同时,各国科学家还对其他基于离子光频跃迁的光钟进行了研究,如德国PTB的 Yb^+ 光钟^[12],英国NPL^[13]和加拿大NRC的 Sr^+ 光钟^[14]。研究证明,离子光钟有可能成为未来的候选光钟之一。通过测量和比对研究,PTB的两台 Yb^+ 光钟的频率一致性达到亚赫兹量级;NPL的 Sr^+ 光钟的频率不确定度也在赫兹量级。

Pound - Drever - Hall 技术可以将激光的频率牢牢锁定在高精细度光学谐振腔上。因此,谐振腔长度的抖动决定了稳频激光器的线宽。来自NIST、JILA、PTB和NPL的科学家们精心设计了光学谐振腔,使得腔的长度对外界的振动不敏感^[15,16]。基于这个想法,JILA的科学家们首先将光学谐振腔垂直支撑,使腔的光轴方向垂直,并且把支撑点选择在通过腔体重心的水平面上^[17]。在这种实验装置中,垂直方向的重力加速度会引起光学谐振腔长度抖动,但是,由于腔体两端的腔镜位置都往同一加速度方向移动,且移动量非常接近,因此总的腔长对垂直方

向的振动不敏感. 运用该方法, 科学家们已经研制成更紧凑的窄带激光系统, 其线宽可压缩至亚赫兹量级. 在近期的一个实验中, 美国科罗拉多大学 JILA 研究所的科学家们, 将波长为 689 nm 的半导体激光器锁定到这种光学谐振腔后, 其线宽被压缩至亚赫兹量级, 用该激光器探测经激光冷却、并被光晶格囚禁的锶(Sr)原子的跃迁, 测得其跃迁线宽为 $2\text{Hz}^{[18, 19]}$, 他们的最新研究结果表明^[20], 光晶格锶原子光钟的不确定度已达到 1×10^{-16} .

Sr 原子的钟跃迁谱线频率已被美国的 JILA、法国的 LNE - SYRTE 和日本的 AIST 及东京大学分别测量过. 他们用基于铯钟的飞秒激光频率梳分别在各自的实验室测量了这条谱线, 测量结果显示该谱线的测量频率偏差小于几个 Hz^[21]. 目前有更多的国家实验室正在建立锶原子光钟或者其他原子的光钟, 这为进一步广泛开展比对研究和评估光钟不确定度创造了条件, 也为光钟成为真正的时间标准奠定了基础.

4 光钟比对, 为建立“秒”的新定义作准备

自从光梳发明之后, 科学家们已经用光梳测量了许多光钟跃迁频率, 测量的精度已达到 $\sim 10^{-15}$, 主要受到了铯原子微波钟目前精度的限制, 与目前的秒定义(基于铯原子 133 同位素的微波频率跃迁)相比较, 光钟将会大大提高它的精度. 科学家们面临的下一个挑战是如何将全球各地的光钟连接起来, 精确地进行频率比对研究, 证明它们能在多高精度内给出同样的时间标准. 如何连接这些跨洲际的光钟, 有多种方法正在考虑之中, 其中一个办法是用通信光纤系统来传输各地的光钟频率标准. 美国 JILA 的综述性文章介绍了一些如何通过光纤系统远程传输高精度光学频率标准信号的技术及其结果^[22]; 同时, 德国 PTB 和法国 LNE - SYRTE 研究所的科学家们运用消除光纤传输相位噪声技术, 在通信光纤中, 传输波长为 1542 nm 的稳频激光^[23], 他们分别在 86km 和 211km 传输距离上, 进行了光频标准在通信光纤中的精密传输试验, 取得了很好的成果; 美国国家标准与技术研究所在 1.5 μm 波段将线宽为 1Hz 的光纤激光成功地实现了 251km 的精密光纤传输^[24]. 科学家期待着有朝一日实现跨洲际的光钟比对研究, 为建立“秒”的新定义提供科学

依据, 从而实现建立光钟的梦想^[25]. 光钟将会在光学和微波波段同时提供高精度的时间频率标准, 长度和时间的基准也将来自同一个源, 可以预期, 光钟将在空间的物理学研究中发挥重要的作用.

50 年前发明的激光为人们提供了非常好的相干光源. 现在, 我们正处在另一个从梦想成为现实的边缘, 那就是用光波来定义“秒”.

参 考 文 献

- [1] Hall J L. Rev. Mod. Phys. 2006 78 :1279
- [2] Hänsch T W. Rev. Mod. Phys. 2006 78 :1297
- [3] Takamoto M, Hong F L, Higashi R *et al.* Nature, 2005, 435 : 321
- [4] Ma L S, Jungner P, Ye J *et al.* Opt. Lett. 1994, 19 :1777
- [5] Diddams S A, Udem Th, Bergquist J C *et al.* Science, 2001, 293 :825
- [6] Ma L S, Bi Z Y, Bartels A *et al.* Science 2004, 303 :1843
- [7] Coddington I, Swann W C, Lorini L *et al.* Nature Photonics, 2007, 1 :283
- [8] Schibli T R, Hartl L, Yost D C. *et al.* Nature Photonics, 2008, 2 :355
- [9] Young B C, Cruz F C, Itano W M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82 :3799
- [10] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V *et al.* Appl. Phys. B, 1983, 31 :97
- [11] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O *et al.* Science, 2008, 319 :1808,
- [12] Schneider T, Peik E, Tamm C *et al.* Phys. Rev. Lett. 2005, 94 :230801
- [13] Margolis H S, Barwood G P, Huang G *et al.* Science, 2004, 306 :1355
- [14] Dubé P, Madej A A, Bernard J E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95 :033001
- [15] Nazarova T, Riehle F, Sterr U *et al.* Appl. Phys. B 2006, 83 : 531
- [16] Webster S A, Oxborrow M, Gill P. Phys. Rev. A, 2007, 75 : 011801
- [17] Notcutt M, Ma L S, Ye J *et al.* Opt. Lett. 2005, 30 :1815
- [18] Boyd M M, Zelevinsky T, Ludlow A D. Science, 2006, 314 : 1430
- [19] Ludlow A D, Huang X, Notcutt M *et al.* Opt. Lett. 2007, 32 : 641
- [20] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K *et al.* Science, 2008, 319 :1805
- [21] Blatt S, Ludlow A D, Campbell G K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100 :140801
- [22] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D *et al.* Rev. Sci. Instrum. 2007, 78 :021101
- [23] Grosche G, Lipphardt B, Schnatz H *et al.* presented on CLEO 2007. Baltimore, MD, USA
- [24] Newbury N R, Williams P A, Swann W C. Opt. Lett., 2007, 32 :3056
- [25] Ma L S. OPN, 2007, Sept., 43