



# 基准原子钟的发展及国家授时中心光学原子钟的研制进展

常宏\*, 张首刚\*, 王心亮, 田晓

中国科学院国家授时中心, 西安 710600

\* E-mail: changhong@ntsc.ac.cn, szhang@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-09

国家重点基础研究计划(编号: 2005CB724501)和中国科学院重要方向项目(编号: KJCX2-SW-T12)资助

**摘要** 本文简要介绍了基准原子钟的发展历程; 目前, 光学原子钟的频率不确定度已达到了  $10^{-18}$  量级, 是现在人们公认的最可能新的时间基准. 国家授时中心担负着国家综合原子时的建立和保持, 是国际原子时 TAI 建立的主要参加单位. 文中介绍了国家授时中心铯光学原子钟研制工作的最新进展.

**关键词** 原子钟, 微波喷泉钟, 光学原子钟

**PACS:** 32.10.Fn, 33.50.Dq, 39.10.+j

利用原子的物理特性实现对时间的精确测量, 可以追溯到 1879 年, 由英国的科学家开尔文勋爵首先提出. 但将这个想法变成技术上现实的原子钟是在近一个世纪后. 1955 年英国国家物理实验室(NPL)铯束原子钟的研制成功, 正式标志着人们时间标准进入原子时代. 经过 50 年的发展, 基准原子钟由最初的原子束钟, 到后来的微波喷泉钟, 直至目前的光学原子钟. 原子钟的准确度由  $10^{-9}$  到目前  $10^{-18}$ , 利用光频标作为新时间基准正在成为现实.

## 1 基准原子钟: 铯微波喷泉钟、光学原子钟

所谓原子钟就是以原子共振频率作为标准时间频率信号的产生装置. 随着 20 世纪初量子物理的诞生和发展, 人们逐渐认识到在原子中电子的能级跃迁是原子的固有共振频率, 可以认为几乎不受外界影响, 同时原子具有的稳定性和普遍性, 使人们可以

利用这种原子中电子能级跃迁时的共振频率作为精确的时间标准. 原子中电子的共振频率可以覆盖从微波波段, 光学波段到 X 射线波段, 跨度接近 10 个量级. 但以人们目前的技术只能对微波波段, 光学波段进行精确的测量. 这种以原子的微波波段共振频率作为时间频率基准的原子钟就是微波原子钟(例如铯原子喷泉钟)<sup>[1]</sup>; 以原子的光学波段共振频率作为时间频率基准的原子钟就是光学原子钟(例如铯原子光学原子钟)<sup>[2]</sup>.

20 世纪初期, 电气工业发展催生的热原子束操控技术, 二战中后期大力发展的微波技术, 是微波原子钟诞生的两个关键性因素. 特别是成熟的微波技术, 使原子精确地被激发并探测和测量其共振频率成为现实. 从 50 年代起, 先后诞生了氦分子钟、铯原子钟、铷原子钟, 氢原子钟等. 对于时间标准, 凡是能最准确的实现定义单位的装置就叫一次标准. 根据原子秒的定义, 只有建造得最好的原子钟才可能作

为时间的一次标准即基准标准. 其中铯原子钟的准确度由1955年的 $10^{-9}$ 达到1975年的 $10^{-13}$ , 原子钟的准确度和稳定度已经比天文时标高了5个量级以上. 从1967年开始, 人们的时间标准改由铯原子基态能级微波共振跃迁频率来定义, 并延续至今. 在原子钟作为基准钟的前30年间是以热的原子束作为工作介质. 从20世纪70年代起, 量子光学, 原子光学兴起, 发展的激光冷却和俘获原子技术, 使原子可以在更精确的范围内被人们操控<sup>[3-5]</sup>. 冷却的原子有着比热原子束更好的量子特性, 在作为时间频率标准上具有固有的优势. 借助激光冷却和俘获原子技术, 20世纪90年代人们将微波原子钟做到了极致——铯原子喷泉微波钟. 因为该钟工作时, 工作物质(铯的冷原子团)的运动形式类似喷泉喷射, 所以得名喷泉钟. 目前全世界正在运行和在研的冷原子喷泉钟约有15台左右, 人类目前的时间基准就是由这些原子钟来实现.

图1是美国国家标准计量局的F-1铯原子喷泉微波钟, 它由170个元器件组成铯原子在其中上下移动类似喷泉喷射不停, 发出极为规则的“时间信号”. 目前性能最好的铯原子喷泉微波钟准确度在 $10^{-16}$ 量级<sup>[1]</sup>.

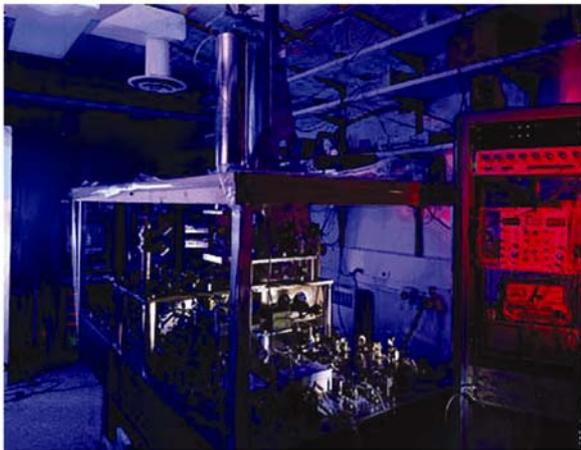


图1 美国国家标准计量局的F-1铯原子喷泉微波钟

在微波原子钟的诞生之初, 人们就有过光学原子钟的构想. 但是直到20世纪末, 人们才能够对光波进行精确的测量. 仅仅不到10年的发展, 这种利用以原子的光学波段共振频率标准作为时间频率基准的钟: 光学原子钟, 将人类对时间、频率的测量精

度又大大的向前提升了一步. 因为光学频率比微波频率高5个数量级, 所以利用原子的光学跃迁频率作为时间频率标准具有比微波频率标准更高的准确度和稳定度. 目前最新光钟的测量精度已经达到了 $10^{-18}$ 量级<sup>[6]</sup>. 当前光钟要解决的主要问题是如何更长时间的稳定工作<sup>[7,8]</sup>. 随着对光钟研究的深入, 人们已广泛预言在21世纪的第二个10年内, 光钟将被用于作为新的时间的定义<sup>[7]</sup>.

我国近年来也积极开展了光钟的实验研究工作, 特别是近两三年来取得了较大的发展. 原子光晶格钟研制方面已经开展了铯原子光晶格钟(中国计量科学院<sup>[9]</sup>、中国科学院国家授时中心<sup>[10]</sup>), 镱原子光晶格钟(中国科学院武汉物理与数学研究所<sup>[11]</sup>、华东师范大学<sup>[12]</sup>), 主动型光钟(北京大学<sup>[13]</sup>). 在离子光钟研究方面已经开展和正在开展的有: 钙离子光钟(中国科学院武汉物理与数学研究所<sup>[14]</sup>), 汞离子光钟(中国科学院武汉物理与数学研究所<sup>[15]</sup>)和铷离子光钟(清华大学<sup>[16]</sup>). 同时在华东师范大学和中国科学院物理研究所在飞秒光梳技术上也已达到国际先进水平<sup>[17]</sup>. 国内光学原子钟的研制已经具有了一定的基础和规模.

## 2 中性原子光学原子钟

光学原子钟有两大类: 一种是利用单离子( $\text{In}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Yb}^+$ 等)产生钟频率信号的离子光钟<sup>[6]</sup>. 目前, 应用单粒子囚禁和激光冷却技术, 美国NIST、英国NPL、法国NMB和德国PTB研究单位分别利用 $\text{Al}^+$ ,  $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Yb}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{In}^+$ 实现了单离子光钟. 其中美国NIST的 $\text{Al}^+$ 光钟在今年频率测量精度突破了 $10^{-18}$ 量级. 但对于离子光钟极低的信噪比和钟效率是其不可克服的弱点. 目前超高性能的单离子光钟(频率测量准确度优于 $10^{-17}$ 以上)只有美国的NIST拥有. 世界上其他国家的单离子光钟大多在 $10^{-15}$ ,  $10^{-16}$ 量级. 另一类是利用中性原子( $\text{Sr}$ ,  $\text{Yb}$ 等)产生钟频率信号的原子光钟<sup>[8]</sup>. 在原子光钟里为了将中性原子限制在Lamb-Dick区进行钟频率探测, 大多采用光晶格的方法来实现, 所以有时也称为光晶格钟. 原子光晶格钟因为其有大量的原子样品可供参考, 对提高信噪比和钟循环效率具有固有优势, 长远来看原子光晶格钟的发展潜力很大. 2002年日本Katori研究组首先实现了铯的光学晶格原子钟. 随后法国OP、德国PTB、英国NPL、美国(NIST, JILA)和欧共体非线性光谱实验室(LENS)等都相继开展冷

原子光钟的研究. 目前, 世界上这方面的最好结果是美国 JILA 的  $^{87}\text{Sr}$  光钟, 实现的准确度达到  $1 \times 10^{-16}$ . 2008 年铯原子的相应跃迁谱线频率值被国际时间频率咨询委员会推荐为二级标准频率. 2009 年, 欧洲空间局 ESA 在组织四家单位研制将运行于卫星上的铯原子光钟和镱原子光钟. 作为欧洲计量研究计划项目, 欧洲四家计量基准单位在共同研究铯原子光钟的性能, 目的是推荐用铯原子能级跃迁重新定义“秒”长.

对于一个基于中性原子实现的原子光钟, 需要由提供原子光学频率标准的原子样品、探测原子光学跃迁频率的超窄线宽的稳频激光探测系统和光学频率测量系统三部分组成. 以铯原子光学原子钟为例: 其中光学频率标准由囚禁的中性铯原子产生, 冷原子被光晶格囚禁, 不受原子间相互碰撞和外界环境干扰且其移动范围小于光波长. 光晶格钟的冷原子样品由于多普勒效应以及原子能级跃迁谱线的自身特点(如散射率低)等因素限制, 需要经过两级冷却并使温度足够低后才能被装载进光晶格, 从而进行钟跃迁探测并获得光频信号.

如图 2 所示, 铯原子一级冷却利用单态间的偶极跃迁( $5s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5s5p\ ^1P_1$ (对应波长 461 nm), 可以获得温度为 mK 量级的原子, 二级冷却用单态和三重态的( $5s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5s5p\ ^3P_1$  能级跃迁(对应波长 689 nm), 可获得  $\mu\text{K}$  量级的冷原子. 冷却的原子为了不受原子间相互碰撞和外界环境干扰且其移动范围小于光波长, 通过“魔术”波长来构成光晶格装载冷却的原子, 可以使原子钟跃迁的基态和激发态的 Stark 频移相同, 最终使原子钟跃迁频率( $5s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5s5p\ ^3P_0$  保持精确不变. 通过线宽达到亚 Hz 量级的超窄线宽激光器(钟跃迁探测波长为 698 nm)探测光频率, 然后利用飞秒

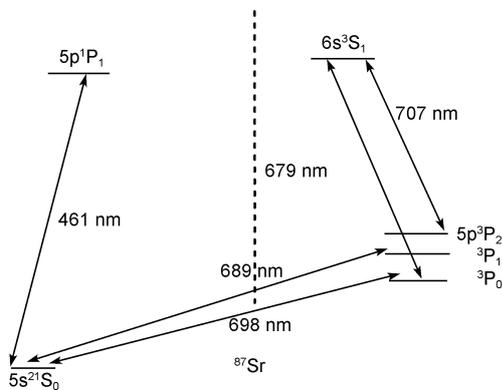


图 2 铯原子能级图

光梳测频系统测量出原子钟跃迁频率, 从而实现整个光钟的运行.

### 3 国家授时中心铯光学原子钟研制进展

国家授时中心担负着国家综合原子时的建立和保持, 是国际原子时 TAI 建立的主要参加单位. 为建立国家授时中心自己未来的基准钟系统, 国家授时中心通过铯光晶格原子钟的研制建立光频标.

铯是第 5 周期 IIA 族的碱土金属元素, 熔点是  $769^\circ\text{C}$ , 沸点是  $1384^\circ\text{C}$ . 铯最外层有 2 个价电子, 由此导致原子会产生单态和三重态的能级结构, 如图 2 所示. 铯有  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ (费米子)和  $^{84}\text{Sr}$  四种同位素, 其自然界丰度分别为 82.58%, 9.86%, 7.0%, 0.56%. 实验中对铯原子的一级冷却利用能级( $5s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5s5p\ ^1P_1$ )进行冷却, 可获得温度为 mK 量级的原子. 图 3 是国家授时中心铯光钟的整体实验平台.



图 3 国家授时中心铯原子光钟实验平台

对于铯原子的初级冷却我们利用 Zeeman 减速器和磁光阱(MOT)装置来实现. 得到了铯原子四种同位素的一级冷却原子团并且观测到相应的冷原子荧光光谱, 利用荧光收集法在实验上测定了  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$  的原子数目.

常温下铯为固态, 根据实验需要将其放置于由加热丝加热的圆柱形无磁不锈钢腔中, 当炉内的固体铯被加热至一定温度后铯原子由准直器准直后喷出, 在腔内形成热原子束. 铯原子在的炉中被加热到  $500^\circ\text{C}$ , 喷出后原子的最可几速率可达 470 m/s. 高速

度的热原子束需要通过激光减速, 才能被磁光阱有效的俘获实现冷却. 实验中我们采用 Zeeman 移频法对高速度的热原子束减速. 实验中采用有效距离为 27 cm 的 Zeeman 线圈, 同时与相对原子共振频率失谐为 -500 MHz, 强度为  $55 \text{ mW/cm}^2$  的左旋圆偏振激光相互作用后, 铯原子的速度被减至几十米每秒.

图 4 显示了利用荧光探测法得到的铯热原子束的荧光图像, 其中蓝色的柱状部分就是铯原子束流. 图 5 是探测热原子束荧光强度得到的荧光谱, 图 5 中可以明显的看到铯的四种同位素中的两种, 较高峰值所对应的是  $^{88}\text{Sr}$  的跃迁谱线, 较低峰值所对应的是  $^{86}\text{Sr}$  的跃迁谱线. 因为横向 Doppler 效应导致谱线加宽, 直接测量铯原子  $(5s^2) ^1S_0 - (5s5p) ^1P_1$  能级跃迁的荧光光谱线宽为 110 MHz (自然线宽为 32 MHz),  $^{88}\text{Sr}$  和  $^{86}\text{Sr}$  跃迁谱线间同位素位移为 124.8 MHz, 所以热原子束荧光谱中  $^{87}\text{Sr}$  的跃迁谱线被  $^{88}\text{Sr}$  和  $^{86}\text{Sr}$  跃迁



图 4 铯热原子束荧光图

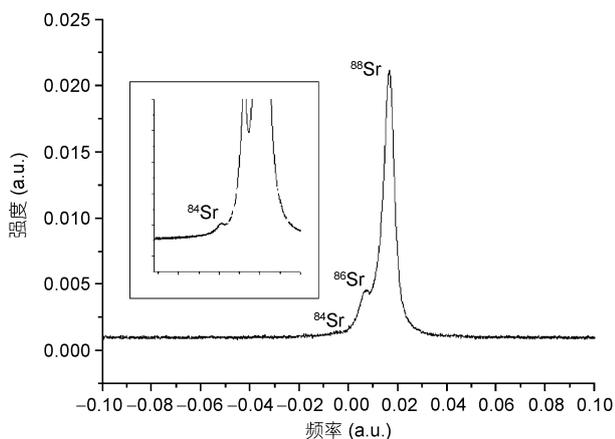


图 5 Sr 热原子荧光谱

谱线所淹没. 将热原子荧光信号放大, 可以看见  $^{86}\text{Sr}$  旁边的  $^{84}\text{Sr}$  的荧光谱.

减速后的铯原子束, 通过标准的磁光阱技术实现对铯原子的一级冷却<sup>[10]</sup>. 图 6 为实验得到的铯四种同位素冷原子团的荧光图像, 因为丰度不同所以四种同位素冷原子团亮度不同, 其中  $^{88}\text{Sr}$  在同位素中丰度最大因此也是最亮的. 由于  $^{84}\text{Sr}$  自然丰度非常小, 因此用荧光法难以计算其数目, 而丰度相对较大的  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$  利用光电探测器来探测荧光强度, 测量得各同位素数目依次为:  $1.759 \times 10^6$ ,  $2.638 \times 10^5$ ,  $1.759 \times 10^5$ .

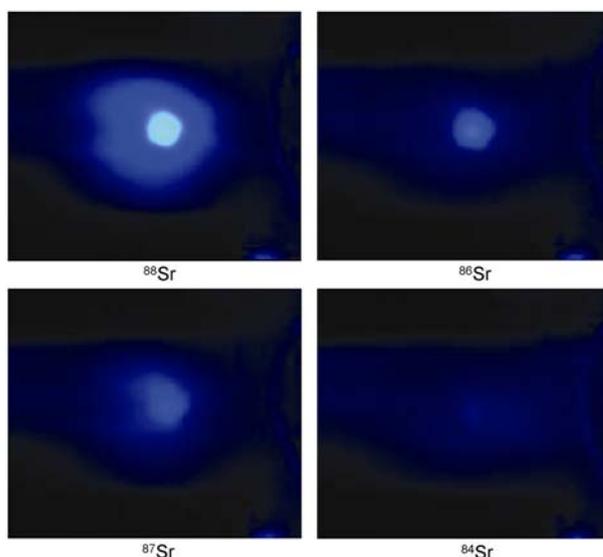


图 6 铯四种同位素冷原子荧光图像

图 7 为探测到的冷原子吸收谱, 对比图 5 中热原子束荧光光谱, 因为冷原子中原子温度降低, Doppler 效应导致的谱线加宽减小, 所以这时可明显地看到在热原子束中无法看到的  $^{87}\text{Sr}$  的荧光谱线.

对于铯原子一级冷却的偶极跃迁  $(5s^2) ^1S_0 - (5s5p) ^1P_1$  并不是一个封闭的能级跃迁, 为了增加一级冷却的原子数目, 更加利于进行二级冷却通过  $((5s^2) ^1S_0 - (5s5p) ^3P_1$  能级跃迁, 对应跃迁波长 689 nm), 通过增加再泵浦光来使原子系统形成封闭的能级结构, 使得一级冷却得到的原子团获得较大而且稳定的原子数目. 实验上我们通过加入波长为 707 nm (耦合能级  $(5s5p) ^3P_2 - (5s6s) ^3S_1$ , 679 nm (耦合  $(5s5p) ^3P_0 - (5s6s) ^3S_1$  两激光作为再泵浦光, 能级结构如图 2 所示. 图 8 和 9 是我们得到的  $^{88}\text{Sr}$  冷原子未加入再泵浦光和加入

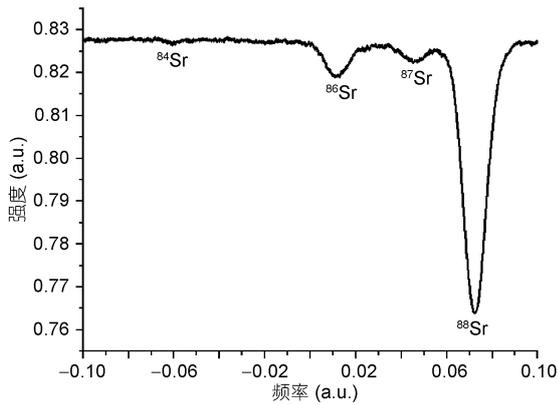


图 7 锶一级冷却原子吸收光谱

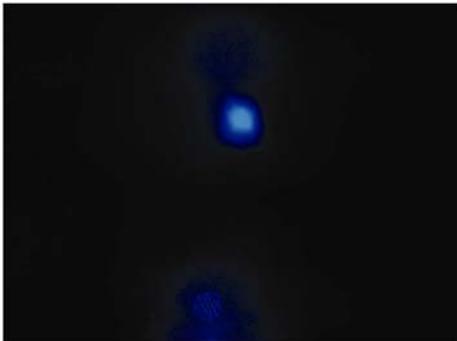


图 8  $^{88}\text{Sr}$  冷原子荧光图像



图 9 加入再泵浦光后  $^{88}\text{Sr}$  冷原子荧光图像

707 nm, 679 nm 再泵浦光后冷原子荧光图像的变化. 对比两图可以明显地看出加入再泵浦光后冷原子荧光光谱强度增强, 冷原子数目增加. 再泵浦光后加入  $^{88}\text{Sr}$  的数目可以由  $10^6$  量级增加到  $10^7$  量级.

锶光学原子钟的冷原子样品由于多普勒效应以及原子能级跃迁谱线的自身特点(如散射率低)等因素限制, 需要经过两级冷却并使温度足够低后才能

被装载进光晶格, 限制原子在 Lamb-Dick 区, 进行钟跃迁探测并获得光频信号. 二级冷却用  $(5s^2)^1S_0 - (5s5p)^3P_1$  能级跃迁(对应波长 689 nm), 可获得  $\mu\text{K}$  量级的冷原子. 对锶原子二级冷却的 689 nm 窄线宽激光器, 我们将一个功率为 15 mW 的外腔激光器锁定到一个精细度为 5000 的高精度光学参考共振腔上作为主激光器, 通过 PDH 法稳定激光器的电流和压电陶瓷使得激光器的线宽被压窄到 2 kHz, 使激光器的线宽小于  $(5s^2)^1S_0 - (5s5p)^3P_1$  能级跃迁的自然线宽 7.6 kHz. 利用这种线宽压窄的激光将已经冷却到 mK 的冷原子进一步冷却到  $\mu\text{K}$  量级, 这时原子的数目预期为  $10^5$  个. 目前我们正在进行这一步的工作. 图 10 是我们用于二级冷却用的 689 nm 窄线宽主激光器系统, 图 11 是用于激光线宽压窄的光学腔.



图 10 689 nm 窄线宽主激光器系统

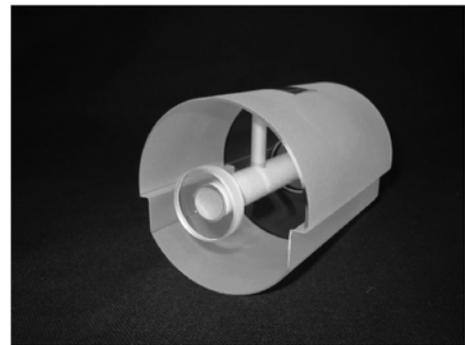


图 11 用于激光线宽压窄的光学腔

在锶原子样品的多级冷却和俘获基础上, 实现向光晶格中的装载. 利用 813 nm 的固体激光器实现光学晶格的产生, 将原子限制在 Lamb-Dick 区. 其中对钟频率探测超窄线宽激光器系统的研制, 我们将采用 ZERODUR 或 ULE 材料加工的超稳定光学腔置

于隔振控温的高真空中, 利用 PDH 方法将外腔稳频后的半导体激光的频率锁定在超稳腔的一个模上, 压窄线宽至 Hz 量级. 在钟频率测量方面, 随着光晶格钟的出现就有测量费米子和测量玻色子钟频率的两种方法. 我们都将开展这两方面的工作, 对于其中的费米子  $^{87}\text{Sr}$  钟信号探测: 利用 Hz 线宽的高稳激光, 对于 1 mHz 线宽的钟跃迁我们首先饱和增宽(饱和光强  $0.4 \text{ pW/cm}^2$ )其到  $\sim 10 \text{ kHz}$ (探测光强  $\sim 40 \text{ W/cm}^2$ )或更大, 以便寻找钟跃迁谱线. 然后, 我们再减小探测光光强来获得较窄的钟跃迁谱线. 在实验中, 我们对跃迁几率的测量, 是利用 461 nm 光激励  $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$  跃迁, 通过荧光信号测量  $^1\text{S}_0$  态原子数的减少量. 装载在光学晶格中的原子数目有一定的涨落, 对光钟频率稳定度的提高是一个限制. 我们将从稳定装原子载数目和信号归一化处理两方面研究提高光学原子钟频率稳定度. 钟频率探测激光在窄吸收共振峰处的频率就是我们所要的光学频率标准, 可以通过飞秒光梳实现精确的测量. 通过伺服系统将钟频率测量激光锁定到原子钟频跃迁的峰上, 就实现了光频标系统的闭环运转. 对于玻色子  $^{88}\text{Sr}$  钟信号探测: 利用多光子过程突破铯玻色子中单态和三重态的偶极禁戒, 相干的原子在 Lamb-Dick 区退相干过程被极大抑制, 使得原子相干谱具有极高的分辨率, 从而能够对碱土金属玻色子单态和三重态偶极禁戒能级实现频率的精确测量. 最终实现利用外光场与碱土金属玻色子耦合, 测量  $^{88}\text{Sr}$  原子的钟跃迁频率. 光钟实现闭环后的另一个主要的工作就是开展光频标——微波频标超高精度比对, 在现行国际秒定义框架下, 力求实现国家授时中心的铯原子喷泉钟和铯原子光钟超高精度频率比对, 进行对铯原子光钟频率的绝对频率溯源比对.

#### 4 原子钟的应用前景及提高精度的意义

原子钟的产生和精度的不断提高是人们对物质

运动层次的认识不断深化的需要, 也是人类物理空间, 信息空间向更深层次扩展的需要. 作为目前人类对时间测量最为精确的实验平台, 超高精度光学原子钟, 最直接也是对人们影响最大的应用就是——新的时间基准将由光学原子钟来实现. 2010年光学原子钟的频率测量准确度突破了  $10^{-18}$  量级, 利用光学原子钟作为新时间基准正在成为现实. 从 2006 年开始, 一些特定原子(汞、铝、铯、镱、铟等)的光频跃迁已经被建议用于作为秒复现的二级标准.

高性能的光学原子钟对基础科学研究有重要的推动作用: 光学原子钟的研制涉及原子光学、量子光学、材料科学、激光技术、精密光谱技术等诸多新兴学科和技术, 研究光学原子钟中的基本物理问题, 探索新的工作机制是推动光学原子钟向更高能力提升的核心所在. 高性能光学原子钟的研制可以积极地促进对这些基本物理问题的科学探索, 同时极大地提升相应的研究手段. 作为当前人们进行时间(频率)测量能力最强大的科学与技术研究平台, 光学原子钟可以直接进行基础物理学的前沿研究探索新的科学规律和进行新的科学发现, 例如对物理常数的测量、广义相对论的检测、冷原子碰撞的实验研究、Stark效应实验研究、重力红移测量等, 这些研究的精度都直接取决于对时间频率的测量精度. 原子钟, 它最初是由物理学家创造出来用于探索物理世界本质的. 它的设计者们从来没有想过这项技术有朝一日竟能应用于全球的导航系统上. 目前, 无论是对于利用卫星导航的GPS系统, 还是基于时间的其他方式的导航, 离开了高性能的原子钟, 这一切都将无从实现. 光学原子钟其强大的时间频率测量能力目前已出现端倪, 至于其未来的全部应用也许目前我们还无法全部预计. 但是科学的发展一再表明时间频率测量精度每提高一个量级, 人们对世界的认识就深入一步. 光学原子钟作为最新, 最有力的时间频率科学研究平台将更好地推动基础科学的研究和发展.

#### 参考文献

- 1 Major F. The Quantum Beat: Principles and Applications of Atomic Clocks. Berlin: Springer, 2007
- 2 Hall J L. Defining and measuring optical frequencies. Rev Mod Phys, 2006, 78: 1279—1295; Ma L S. Optical clock. Physics, 2008, 37: 716—719
- 3 Phillips W D. Laser cooling and trapping of neutral atoms. Rev Mod Phys, 1998, 70: 721—741

- 4 Demtröder W. Laser Spectroscopy. 3rd ed. Berlin: Springer, 2006
- 5 Davis C C. Lasers and Electro-optics. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- 6 Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, et al. Frequency comparison of two high-accuracy  $\text{Al}^+$  optical clocks. Phys Rev Lett, 2010, 104: 070802
- 7 Wallard A. News from the BIPM-2006. Metrologia, 2007, 44: 97103
- 8 Ludlow D, Zelevinsky T, Campbell G K, et al. Sr lattice clock at  $1 \times 10^{-16}$  fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca Clock. Science, 2008, 319: 1805—1808
- 9 Wang S K, Wang Q, Lin Y G, et al. Cooling and trapping  $^{88}\text{Sr}$  atoms with 461 nm Laser. Chin Phys Lett, 2009, 26: 093202
- 10 Xiao T, Chang H, Wang X L, et al. Trapping four isotopes of Strontium in a MOT by using Zeeman slowing. Acta Opt Sin, 2010, 30: 898—902
- 11 Zhao P Y, Xiong Z X, Long Y, et al. Realization of green MOT for ytterbium atoms. Chin Phys Lett, 2009, 26: 083702
- 12 Xu X, Wang W, Zhou Q, et al. Laser cooling and trapping of ytterbium atoms. Front Phys China, 2009, 4: 160—164
- 13 Yu D S, Chen J B. Optical clock with millihertz linewidth based on a phase-matching effect. Phys Rev Lett, 2007, 98: 050801
- 14 Hai W H, Huang S X, Gao K L. Wavepacket trains of a Paul trapped ion. J Phys B-At Mol Opt Phys, 2003, 36: 3055—3061
- 15 She L, Wang W M, Bai L, et al. Fluorescence detection and buffer gas cooling of trapped mercury ions in Paul trap. Chin Phys Lett, 2008, 25: 1653—1656
- 16 Wang Y H, Dumke R, Zhang J, et al. Absolute frequency and isotope shift measurements of the cooling transition in singly ionized Indium. Chin J Quant Electron, 2008, 25: 129—134
- 17 Zhang W, Han H N, Zhao Y Y, et al. A 350 MHz Ti:sapphire laser comb based on monolithic scheme and absolute frequency measurement of 729 nm laser. Opt Express, 2009, 17: 6059—6067

## **The development of atomic clock for time keeping and the Strontium optical clock in National Time Service Center**

CHANG Hong<sup>\*</sup>, ZHANG ShouGang<sup>\*</sup>, WANG XinLiang & TIAN Xiao

*National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi' An 710600, China*

A brief history of atomic clock for time keeping and its development introduced. At present, the frequency uncertainty of  $10^{-18}$  can be reached by optical clock. Optical clock is now recognized that the most likely for the new time and frequency standard in the future. National Time Service Center responsible for the overall national Atomic Time to build and maintain in China, is the establishment of the International Atomic Time TAI major participating units. We give a introduction of the Strontium optical atomic clocks in National Time Service Center and its latest development.

**atomic clock, microwave fountain clock, optical clock**

**PACS:** 32.10.Fn, 33.50.Dq, 39.10.+j,