

从 CPT 原子钟到光钟

邱 实¹ 张军海²

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

提 要

简要介绍了新型 CPT (Coherent population trapping, 相干布局囚禁) 原子频标及光频标的基本原理和研究进展。被动型 CPT 铷原子钟物理部分的目前体积可控制在 100cm^3 以内, 功耗 1W 左右, 其稳定度为 $4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ (τ 为测量取样的时间间隔)。CPT 原理的铯原子频标的物理部分体积减小到 1cm^3 , 功率减小到 30mW, 稳定度为 $6 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$, 成为当今体积最小、功耗最低的原子钟。随着飞秒激光梳状发生器技术的发展, 已将传统的谐波光频链的体积从几间实验室缩小到 $1.2 \times 1.0\text{m}^2$ 的光学平台上, 它与光频测量技术的结合, 使微波频标与光频标联系起来, 建立了光钟, 它的稳定性可以从现在的 10^{-16} 的水平提高到 10^{-18} 乃至 10^{-22} 水平, 成为当前最精密的时间计量仪器。

主题词: CPT 原子钟 — 飞秒激光梳状发生器 — 光钟

分类号: TH714.1

1 引 言

自 1948 年美国国家标准局第一次用氨分子吸收谱线, 实现了对石英晶体振荡器的频率锁定, 建成了世界上第一台原子钟以来, 科学工作者对不同化学元素, 不同振荡结构的原子钟进行了大量的研究, 但仅有使用氢、铷和铯三种元素的原子钟成为商品, 得到广泛应用。但由于该三种原子钟的工作机理不同, 其性能指标上存在显著的差异。人们在追求缩小原子钟体积, 增加其实用性方面, 提出了相干布局囚禁 (Coherent Population Trapping, 简称 CPT) 原子钟; 在追求准确度方面提出了喷泉原子钟。随着激光冷却和囚禁原子技术 (获 1997 年度 Noble 物理学奖) 的发展, 及上世纪末飞秒激光梳状 (获 2005 年 Noble 物理学奖) 发生器的发明, 使光频测量成为可能, 进而发展了新一代准确度最高的钟——光钟, 由于原子喷泉钟从机理上和光抽运铯原子钟及传统铯钟有很多相近的地方, 这里无需冗述。

2 CPT 原子钟

所有经典微波频标的特点都是把原子基态的 0-0 跃迁作为参考频率来锁定晶体振荡器。为提高参考信号的强度, 在原子产生 0-0 跃迁前, 都要经历一个原子态的制备过程, 运用了磁场空间偏转技术和光抽运技术 (如氢 H, 铷 Rb, 铯 Cs 频标), 其特点是原子态的制备和 0-0 跃迁在不同的时间和空间依次进行。然而上世纪 70 年代 Alzetta 等人发现了 CPT 现象^[1], 使用

一个 Λ 结构封闭三能级原子系统,可以把两个过程合二为一,大大压缩量子系统的空间。例如 CPT 型 Rb 原子频标可以使其物理部分的体积控制在 100cm^3 以内,功耗 1W 左右,其稳定度与时间的关系为 $4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ (τ 为测量取样的时间间隔)^[2]。中国科学院上海光机所也开展 Rb 原子 CPT 频标的研制工作,其秒级稳定度的目标达到 2×10^{-12} ,天稳定度达到 2×10^{-14} 。最近美国科罗拉多大学的 Brannon 的研究显示^[3]:Cs 原子 CPT 频标物理部分的体积小于 1cm^3 ,功耗 30mW,稳定度为 $6 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$,成为当今体积最小、功耗最低的原子钟。CPT 型原子频标的物理机理是用一个微波信号去调制一束光波(激光的频率锁定在激发态和两个基态跃迁的中间频率处),使激光产生两个振幅相等的一级边带频率 J_{+1} 和 J_{-1} ,且这两个频率的间距满足超精细结构的 0-0 跃迁。以如图 1 所示的 Rb 原子为例^[4],Rb 原子基态的 $|5S_{1/2}, F=1, m_F=0\rangle$, $|5S_{1/2}, F=2, m_F=0\rangle$ 与激发态 $|5P_{1/2}, F'=2, m_{F'}=0\rangle$ 构成 Λ 结构三能级原子系统。此时,两个基态能级通过激光的两个边带同时与一个激发态能级发生共振,通过光电探测器可以检测到荧光的强度。当两个激光边带的差频等于原子基态 0-0 跃迁的频率时,就会实现基态两能级完全相干,荧光强度为最小;否则光电探测器会发现荧光增加,我们调整激光的微波调制信号频率,直至其荧光为最小,此时,把晶体振荡器的频率锁定到了原子双光子共振的谱线上,就能实现被动式 CPT 型原子频标。文献[4,5]指出 CPT 型原子频标输出频率的准确度需要进行磁场频移、缓冲气体频移和光频移的修正。和传统频标类似,也存在 CPT 型主动式原子频标,但由于其工作机理是把微波信号进行放大,因此要求原子之间的相干位相与微波场位相之间满足匹配的关系^[6,7],其复杂程度比被动式 CPT 原子频标复杂得多,因此在实际中很少采用。

图 1 绘出了⁸⁷Rb 原子被动式 CPT 频标的量子部分的实验原理图。可以看到, CPT 型 Rb 频标的量子部分主要由 Rb 泡、激光器和光电探测器等组成。Rb 泡内充有⁸⁷Rb 和缓冲气体,Rb 泡安置于内有 C 场线圈的磁屏蔽筒内,Rb 泡温度保持很高稳定度,由 $\frac{1}{2} \nu_{\text{hf}}$ 的微波信号调

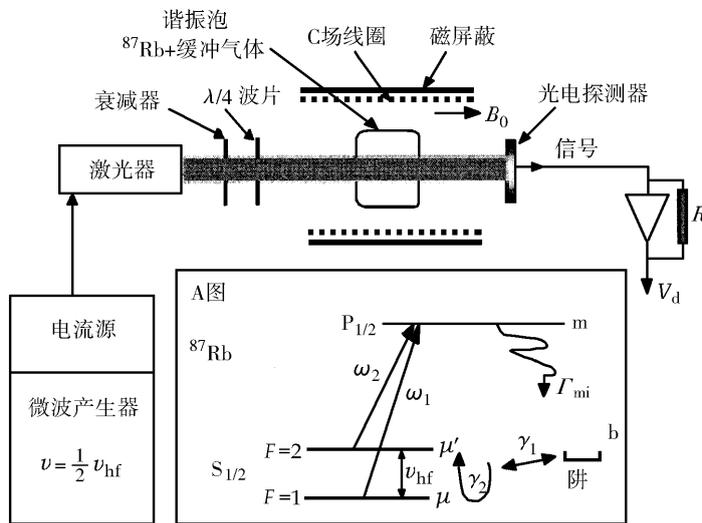


图 1 CPT 型 Rb 频标的量子部分的实验原理装置及有效能级图

Fig. 1 The experiment arrangement of quantum part of a Rb frequency standard (CPT) and the diagram of valid energy levels

制激光器光波,光波穿过 Rb 泡,由光电探测器检测透射激光光强,测得的光强信号经 A/D 变换后输入到微波控制器,然后经过数据处理、D/A 转换,分两路分别对激光器直流电流和 VCO 进行控制,来调整激光器输出光波的频率和激光器的调制信号幅度以实现系统的闭环工作。

3 飞秒激光梳状发生器

人们在实现了通过原子钟对微波频率进行精密测量以后,也就开始考虑对振荡频率更快的光频进行标定,然而光学频率的精密测量一直是困扰人们的难题,因为可见光频率在 5×10^{14} Hz 左右,而到目前为止,最准确的频率标准为铯原子频标,其振荡频率为 9 192 631 770 Hz,准确度为 5×10^{-15} ,振荡频率相差 5×10^4 倍。因此须建立一条精密的频率测量链,人们发现使用锁相倍频的技术可以把一红外波段的激光器锁定到铯原子频标上,然后用该红外激光器与待测稳频激光频率进行比对,测量其准确的频率。1978 年德国物理学家亨施教授提出用短脉冲激光进行激光频率精密测量的方法^[8]。其基本思想是将时域内等时间间隔的脉冲激光通过傅里叶变换转换成等间距的频率间隔^[9]。如图 2 所示,假设时域上脉冲间隔为 τ ,则对应于频域变成频率间隔 $f_{\text{rep}} = 1/\tau$,因此假定知道光梳中某条谱线的频率 f_0 ,则其他未知谱线的频率为 $f_0 + n f_{\text{rep}}$ 。但是,通常情况下,光脉冲在谐振腔内传播时,其群速和相速不同,当光在腔内来回一次后,群速和相速之间会产生 $\Delta\Phi$ 相差,对应的频率差为: $\delta = \frac{\Delta\Phi}{2\pi\tau}$,一般把这个频率称为偏置频率。

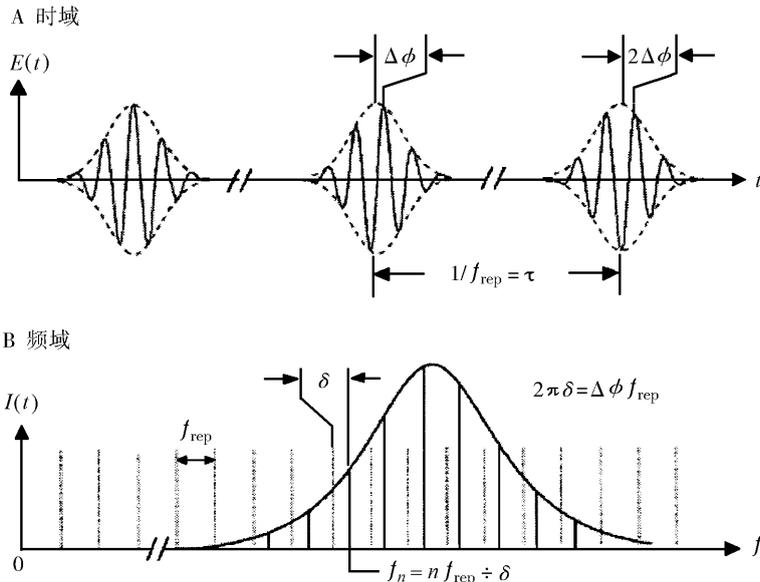


图 2 梳状频率发生器中时域和频域的对对应关系

$\Delta\Phi$ 为相速度不等于群速度造成的载波与包络之间的相位差

Fig. 2 The relation between time area and frequency area in Comb frequency generator

由于一般情况下,激光的腔长存在抖动,因此频率间隔 f_{rep} 和偏置频率 都不完全确定,要保持这一系列梳状频率稳定,必须要固定偏置频率 δ 和频率间隔 f_{rep} 。这就是梳状发生器的核

心技术。上世纪末飞秒激光的出现,使得同时控制 δ 和 f_{rep} 成为可能。亨施和霍尔合作,利用锁相技术可以对重复频率 f_{rep} 进行锁定,并利用微结构光纤^[9,10],将飞秒激光的带宽从 700 ~ 900nm 扩展到 500 ~ 1200nm,利用自倍频的方法,对 δ 进行了锁定, δ 和 f_{rep} 都处于微波频段,只要用铯原子钟就可以很容易实现 δ 和 f_{rep} 的精确锁定,其不确定度达到 10^{-15} 水平。这样第 n 级光梳频率 $f_n = \delta + nf_{\text{rep}}$ 精确地被标定。如要测量任一未知激光频率 f_x ,只要测出该光与其临近光梳频率 f_n 的差值 Δf ,则未知激光的频率为: $f_x = \delta + nf_{\text{rep}} + \Delta f$,与铯原子钟具有相同的不确定度,这样实现了对 500 ~ 1200nm 波段范围内激光频率的精密测量。为光钟频率的测量奠定了坚实的理论和实验基础。最早研制飞秒激光光梳的是德国 Max-Planck 实验室的亨施教授,他于 2000 年就实现了飞秒激光光梳与谐波倍频链的比对,其不确定度为 10^{-16} ^[11];最新的光频链技术,已将传统的谐波光频链的体积从几间实验室缩小到 $1.2 \times 1.0\text{m}^2$ 的光学平台上^[12]。国内华东师范大学研制的飞秒激光光梳合成频率的不确定度达到 10^{-19} 水平^[13],该成果得到了 2005 年 Nobel 物理学奖获得者亨施教授的褒奖。

4 光 钟

光钟作为比原子钟准确度更高的频率发生器主要由三部分组成:(1) 能产生稳定周期信号的振荡器,即稳频激光器(相当于原子频标的本振);(2) 用来锁定稳频激光器的鉴频装置(相当于原子频标的原子跃迁谱线),它是由囚禁在磁光阱中温度为 μK 量级的单离子(或原子)产生的处于光波段的跃迁;(3) 能将光学频率和原子频标联系到一起的频率分配器,即光学频率梳状发生器,能使光钟与微波钟联系起来,进行方便的频率比对,以对原子钟进行修正。由于光频标的跃迁频率是极低温原子发出的,因此其多普勒频移、碰撞频移都很小,其准确度预期可以达到 10^{-18} ,被一致认为是代替原子钟的下一代频标。美国 NIST 已成功建立了 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟(如图 3 所示)^[14,15]。其 $^{199}\text{Hg}^+$ 对应于 $2S_{1/2}(F=0, M_F=0) \longleftrightarrow 2D_{5/2}(F=2, M_F=0)$ 的电四极矩的跃迁的输出频率为 $1.06472160989914494\text{PHz}$ (282nm),其自然线宽为 2Hz,因此其优值系数可以达到 10^{14} 量级。比氢原子频标的优值系数还要高 5 个数量级;用超稳频染料激光器做为“本振”,其输出波长为 563nm (532THz),正好与 $^{199}\text{Hg}^+$ 跃迁的二次分频对应,因此就实现了把稳频激光器的输出频率锁定到了 $^{199}\text{Hg}^+$ 跃迁的谱线上,实现了 $^{199}\text{Hg}^+$ 的光钟。美国 NIST 在制造 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟方面取得了极出色的成果,对影响其系统稳定性和准确度的 8 个因素进行了分析,得到:其准确度为 4×10^{-16} ,长期稳定度为 7.2×10^{-17} ,被誉为当今最准确的钟^[15];国内北京大学及华东师范大学都开展光钟方面的工作,但还没有相关实验结果的报道。

$^{199}\text{Hg}^+$ 光钟的系统构成如图 3 所示。其工作原理为:PLL1 控制飞秒脉冲激光器的抽运功率,使 f_0 锁定在 f_r 上,得到 $f_0 = \beta \cdot f_r$ 。光频标准与光频梳的第 m 个模式通过 PD2 的拍频得到 f_b ,经过 PLL2 对飞秒脉冲激光器腔长进行控制,使其锁定在 f_r 上,得到 $f_b = \alpha \cdot f_r$,由于 $f_m = f_0 + m \cdot f_r$, $f_m + f_b = f_{\text{Hg}}$,则 $f_r = \frac{f_{\text{Hg}}}{m + \beta + \alpha}$, (β, α 均为常数, m 是自然数),此时系统将 f_r 锁定在光学频率标准上,实现了光钟微波频率的输出。选择适当的控制参数,使 $\beta = -\alpha$,得到 $f_r = \frac{f_{\text{Hg}}}{m}$, f_r 即为 f_{Hg} 的 m 次分频。通过 PD3 输出信号 f_r 经处理对 VCO 控制,得到 100MHz 频率输出。

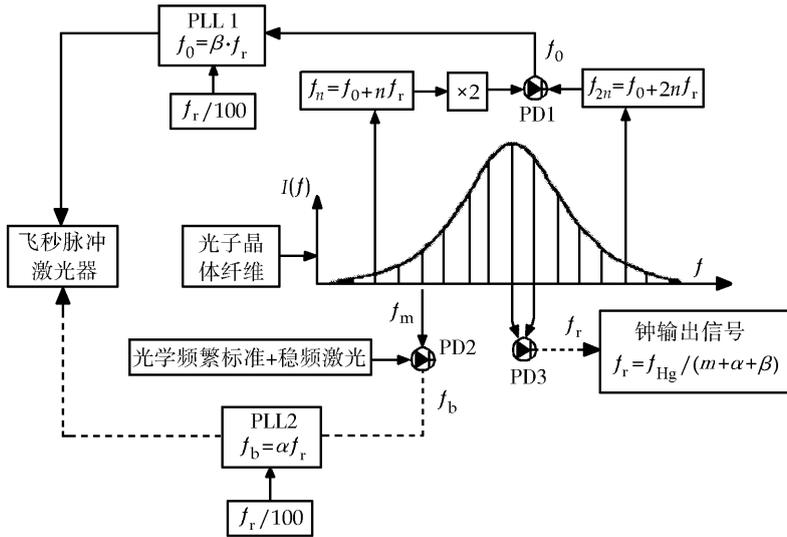


图3 光钟系统框图

f_0 为飞秒激光的偏置频率; f_r 为光梳的频率间隔; f_m 为光梳第 m 个模的频率;

f_b 为光频标与光梳第 m 模式的频差; PLL 为锁相环; PD 为光电二极管

Fig. 3 A simplified diagram of optical clock system

因为飞秒激光梳状频率发生器的频率输出范围(500 ~ 1200nm)覆盖所有红外和大部分可见光波段,不但可以对光波频率进行精确测量,同时把相邻两条谱线的差频取出(微波频段),亦可以对微波原子频标进行校准。

5 结束语

时频技术经过科学家们的长期不懈努力,得到了很快的发展.在原子频标方面,我们可以得到体积和功耗很小的 CPT 型原子钟,同样通过光钟的建立,在稳定性方面可以从现在的 10^{-16} 的水平提高到 10^{-18} 乃至 10^{-22} 水平。我们期待我国的时频技术能跟上世界先进水平。

参 考 文 献

- [1] Soo Chang, Taeg Yong Kwon *et al.* PRA, 1999, 60: 2308
- [2] Knappe S, Schwindt P D *et al.* OPTICS EXPRESS, 2005, 13: 1249
- [3] Brannon A, Garginov V *et al.* Electronics and Photonic, 2006, 118 ~ 121
- [4] Vanier J, Levine M, Janssen D *et al.* PRA, 2003, 67: 065801
- [5] Vanier J. Applied Physics B, 2005, 81: 421
- [6] Vanier J, Godone A, Levi F. PRA, 1998, 58: 2345
- [7] Godone A, Levi F *et al.* PRA, 2004, 70: 012508
- [8] Eckstein J N, Ferguson A I, Hansch T W. PRL, 1978, 40: 847
- [9] Jones D J, Diddams S A. Science, 2000, 288: 635

- [10] Reichert J, Niering M, Holzward R. PRL, 2000, 84: 3232
- [11] Holzwarth R, Udem Th Hänsch T W. PRL, 2000, 85: 2264
- [12] 费立刚等. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 12
- [13] Longsheng M, Ziyi B *et al.* Science, 2004, 303: 1843
- [14] Diddams S A, Udem T *et al.* Science, 2001, 293: 825
- [15] Oskay W H, Diddams S A *et al.* PRL, 2006, 97: 020801

FROM CPT CLOCK TO OPTICAL CLOCK

Qiu Shi¹ Zhang Jun-hai²

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;
2. Science School of Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract

This paper describes the basic principle and the research progresses of the CPT (Coherent Population Trapping) atomic frequency standard and the light frequency standard. The physics package of Rb maser (CPT, passive) can be controlled in the 100 cm^3 , lower 1 W consumptions and the stability is $4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$. To Cs maser, CPT, the physics package is only about 1 cm^3 , the consumption is lower 30 mW, the stability is better than $6 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$. It is the minimum atomic clock with lowest consumption in the world currently. As the development of technology, the comb generator of femto-second laser combs has been integrated on the optics stage of $1.2 \times 1.0 \text{ m}^2$. Since combining the femto-second laser combs with optics measure method, the light clock is set up. Its stability can raise 10^{-16} to 10^{-18} or 10^{-22} , it will become the most precise time instrument at present.

Key words CPT(Coherent Population Trapping) clock — Comb generator of femto-second laser — Optical clock