

从长度米到时间秒: 稳频激光-铯喷泉钟-飞秒光梳-铷光晶格钟

李天初, 方占军

中国计量科学研究院, 北京 100013

E-mail: litch@nim.ac.cn

2011-02-12 收稿, 2011-03-07 接受

科技部基础研究专项课题(G99-B-14)、科技基础性工作专项资金(2001DEA30028)、国家重点基础研究发展计划(2005CB724504)和国家科技支撑计划科学仪器设备研制与开发项目(2006BAK03A20)资助

摘要 报道了近年来中国计量科学研究院(NIM)在时间频率基准领域的研究进展: 稳频激光波长实际实现国际单位制(SI)的长度单位米(m); NIM5 铯喷泉钟以不确定度 2×10^{-15} 复现时间单位秒(s); 飞秒光学频率梳建立光学频率与微波频率的相干联系, 以优于 4×10^{-14} 的不确定度实现光学波长向标准微波频率的溯源标定; 以及正在研制的铷原子光晶格钟, 为应对未来修改秒定义做准备. 另外, 文中还提出飞秒光梳是从动跟踪系统, 描述其性能的指标应当是它的跟踪精度; 估计了“吸收室-原子束-原子喷泉-原子/离子存储”四种频率参考方案可能达到的不确定度极限.

关键词

计量
时间频率基准
稳频激光
原子喷泉钟
光钟
飞秒光梳

1 稳频激光光学波长标准: 实际实施米定义

自 Michelson 时代, 光干涉就成为长度测量准确度最高的手段.

1960 年激光的发明提供了一种理想的相干光源. 经频率稳定的激光频率/波长不确定度可以高达 10^{-11} , 甚至 10^{-13} ^[1](频率评定中常使用相对不确定度 $\Delta \nu / \nu_0$, 并略去相对二字, 置信度 1σ ; $\Delta \nu$ 为绝对频率不确定度; ν_0 为名义频率).

1983 年, 国际计量大会(CGPM)颁布了现行米(m)定义^[2]:

$$L = c t, \quad (1)$$

式中 c 表示真空光速, t 为时间, 并将 $c=299792458$ m/s 定义为无误差普通常数^[2].

依照长度定义可以准确测量千米以上的大距离长度(如激光调制-比相法、激光脉冲测时法和全球定位系统 GPS 测距), 但按米定义直接测量中小长度则很难达到比较好的不确定度.

在定义真空光速 c 为普通常数后, 电磁波的真空波长 λ_0 和频率 f 按下式联系起来^[2]:

$$c = f \lambda_0. \quad (2)$$

(2)式表明, 频率和波长间的转换不引入误差. 直接测量光波长的不确定度很难优于 10^{-10} . 测量频率, 依照(2)式将波长溯源到频率间接实现米定义, 则极大改善了光学波长的测量不确定度.

在 2000 年之前, 按(2)式间接实现米定义非常困难, 无法在日常实际计量中实施. 国际上依据少数几个实验室按(2)式标定的特定辐射波长值, 陆续推荐了 13 条谱线的真空波长值及不确定度, 包括碘($^{127}\text{I}_2$) 633 nm, 532 nm, 乙炔($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$)1542 nm 等, 实际实现米定义(practical realization of the definition of the metre)用于光学干涉测量^[1].

中国计量科学研究院(NIM)自 20 世纪 70 年代先后研制了近 10 种稳频激光^[3-7]. 目前, NIM 保存着 $^{127}\text{I}_2$ 稳频 He-Ne 激光 633 nm(不确定度 2.1×10^{-11})^[1] 和 Nd:YAG 固体激光 532 nm(不确定度 8.9×10^{-12})^[1],

乙炔($^{13}\text{C}_2\text{H}_2$)稳频 1542 nm 波长标准, 提供我国长度干涉计量和光学波长计量的溯源服务.

2 时间/微波频率基准: NIM 激光冷却-铯原子喷泉钟

1983 年米定义意味着在计量意义上长度单位米不再是一个定义量, 而从时间单位秒导出. 随之, 光学波长也溯源到时间频率基准.

1967 年国际计量大会将时间单位秒的定义从天文秒改为基于铯原子(^{133}Cs)基态超精细分裂微波辐射频率 $f=9192631770$ Hz 的原子秒^[8]. 自那时起, 实验室型铯原子钟提供复现秒定义的手段.

20 世纪 40 年代, Rabi 等人^[9]发展了分子束磁共振原理, 奠定了原子频标的基础. 1955 年英国物理研究所(NPL)的 Essen 等人^[10]建成了世界第一台铯原子束频标. 1949 年 Ramsey^[11]提出粒子与电磁波场 2 次作用发生 Ramsey 谐振. 对同样的粒子运动长度, Ramsey 跃迁线宽比 Rabi 跃迁大幅度变窄. 1989 年 Chu 等人^[12]首次实现原子激光存储和激光冷却, 为冷原子钟铺平了道路. 早在 1954 年 Zacharias^[13]就提出了原子喷泉的设想, 1991 年 Clairon 等人^[14]利用行波“光学黏胶”上抛原子, 实现了可实用的原子喷泉.

实验室型原子钟经历了磁选态、光抽运两代热铯束原子钟, 1995 年法国计量局时间频率研究所(SYRTE)Clairon 小组率先报道了第三代频率基准装置“激光冷却-铯原子喷泉钟”^[14], 到 2010 年世界最好的铯喷泉钟不确定度达到 $(4\sim 5)\times 10^{-16}$ ^[15].

2003 和 2010 年 NIM 分别研制成功 NIM4 和 NIM5 激光冷却-铯原子喷泉时间频率基准装置^[16-20]. NIM5 喷泉钟由物理、激光-光学和电子-测控三部分组成(图 1), 图 2 表示物理部分的布局.

三维正交光场和反 Helmholtz 磁场构成磁光阱(MOT), 在高真空中俘获原子, 形成冷原子云. 向上的三束和向下的三束激光同时反向失谐, 形成向上运动的光学黏胶(OM), 带动冷原子上抛. 控制激光的频率和强度, 按偏振梯度冷却机制实施后冷却, 使原子温度降至 $<2 \mu\text{K}$, 布朗运动速度 $<2 \text{ cm/s}$. 超冷原子云以获得的初速度自由上抛、回落, 形成原子喷泉.

激光存储制备较高原子数的原子云、行波光学黏胶技术保证原子上抛不被加热和打散、激光冷却使原子云经喷泉运动后仍保持一定原子密度, 正是这一系列现代冷原子操控技术使原子喷泉从理论设想变为实验现实.

实验室型铯原子钟按被动原理工作. NIM 铯喷泉钟用独立运转的氢钟(H-maser)作为频率参考, 经专门研制的频率综合器产生高谱纯度、窄线宽、可精细调谐的 9192631770 Hz 微波. 原子在上抛-回落的喷泉运动中 2 次与激励微波场作用, 实现 Ramsey 跃迁. 原子继续下落与探测光作用, 发出共振荧光, 由探测器组接收.

NIM4 钟用磁光阱制备原子云. 磁光阱获得的原子数多, 信噪比(S/N)好, 但原子密度大, 导致碰撞频移大. NIM5 采用直接光学黏胶(OM)制备冷原子云, 牺牲 S/N, 减小冷原子碰撞效应.

时序控制扫描微波频率, 得到图 3 所示的 NIM5 钟 Ramsey 跃迁曲线. Ramsey 条纹的横坐标为微波频率, 纵轴为探测器组得到的 Cs 原子云处于基态两能级的跃迁几率. Ramsey 跃迁的质量是原子钟软硬件性能和实验水平的综合标志. 图 3 表明, 尽管 NIM5 钟用直接光学黏胶制备原子云, 它的运转状态已经达到实际要求.

铯喷泉钟的 Ramsey 谐振中心条纹的中心频率复

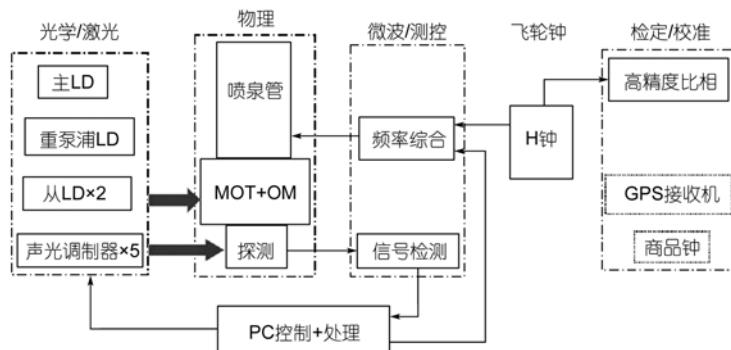


图 1 NIM5 铯喷泉钟的三部分：激光-光学、物理和电子测控

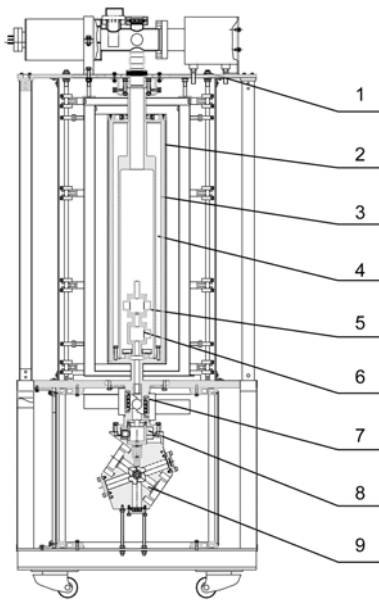


图2 NIM5物理部分

1, 顶部钛泵; 2, μ -合金磁屏蔽; 3, C-场线圈; 4, 喷泉管; 5, Ramsey 微波腔; 6, 上选态微波腔; 7, 探测系统; 8, 下选态微波腔; 9, 磁光阱体

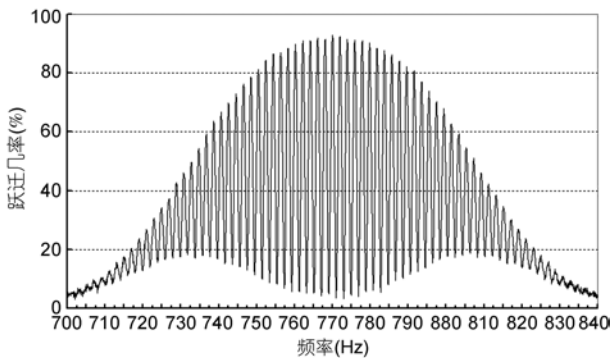


图3 NIM5钟的Ramsey跃迁实验曲线

直接光学黏胶, 喷泉高度 81 cm, Ramsey 条纹线宽~1 Hz

现秒定义. NIM 喷泉钟利用方波调制微波, 经 Ramsey 中心条纹鉴频, 产生带有微波中心频率误差信息的跃迁几率信号, 数字伺服修正氢钟 H1 产生标准微波频率.

实验室型铯原子钟的目标是复现原子秒定义, 铯原子样品应该严格处于无干扰的理想工作状态. 任何偏离理想条件的因素, 一方面可能使得参考频率线宽加宽, 导致频率稳定性和复现性变坏; 另一方面可能引起参考中心频率偏移, 致使实际锁定频率偏离预期值. 基准原子钟在设计上尽可能避免或减

小干扰, 在此基础上, 仍然需要在理论模型指导下, 独立地逐项评定剩余的偏离理想状态产生的系统频偏, 依照评定结果修正实际锁定频率, 最终得到标准频率和不确定度. 系统频偏的独立评定是所有实验室基准钟的基本功能, 也是其区别于商品原子钟的重要特征. 表1列出了2010年10月评定得到的NIM5铯喷泉钟系统频率偏移和评定不确定度.

铯喷泉钟利用当代最前沿的科学技术成果, 从原理上克服了传统铯束钟的几项重要误差源, 同时有利于改善对剩余系统误差评定的不确定度, 将时间频率基准的稳定度、复现性和评定不确定度提高到一个新水平.

NIM5 钟达到主要性能技术指标如下: (1) 年运行>300天, 30天准连续运行运行率>99%; (2) 频率稳定度 $8 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$; (3) 典型系统频率偏移评定不确定度 $< 2 \times 10^{-15}$.

铯喷泉钟的稳定度和复现性都接近时间频率测量的极限, 频率/时间的比对是验证其技术指标的最好方法. 图4给出了NIM5通过参考氢钟-GPS载波相位与美国GPS原子时的3个月比对数据, 其中横轴表示日期, 纵轴是以 ns 为单位的时间差. 图4显示, NIM5比GPS快约 3×10^{-15} . GPS时标依照基于商品铯原子钟的传统模式建立, 国际几台基准喷泉钟与传统时标比对的平均结果表明, 基准钟比传统原子时标快 $(2-5) \times 10^{-15}$ [15]. 上述比对实验结果是对NIM5自主评定指标(典型 1σ 不确定度 2×10^{-15})的有力佐证.

NIM 依照传统原理利用商品铯原子钟组驾驭商品氢钟组守时, 经由 GPS 参加国际计量局(BIPM)的国际原子时协作, 产生中国计量院原子时 TA(NIM).

表1 NIM4钟2005年8月主要系统频率偏移评定^{a)}

序号	偏差源	频率偏移 (10^{-15})	不确定度 (10^{-15})	备注
1	二级 Zeeman 效应	72.4	0.4	$H_c=124.7$ nT
2	冷原子碰撞	-3.8	1.0	
3	微波功率相关	1.7	1.5	
4	黑体辐射	-16.2	0.1	腔体温度 (23 ± 1) $^{\circ}$ C
5	重力	3.8	0.1	海拔高度 34.5 m
6	光频移	0.0	0.1	
7	腔牵引	0.0	0.1	
	合成	57.8	1.9	

a) 直接光学黏胶, 喷泉高度 81 cm, Ramsey 条纹宽度~1 Hz

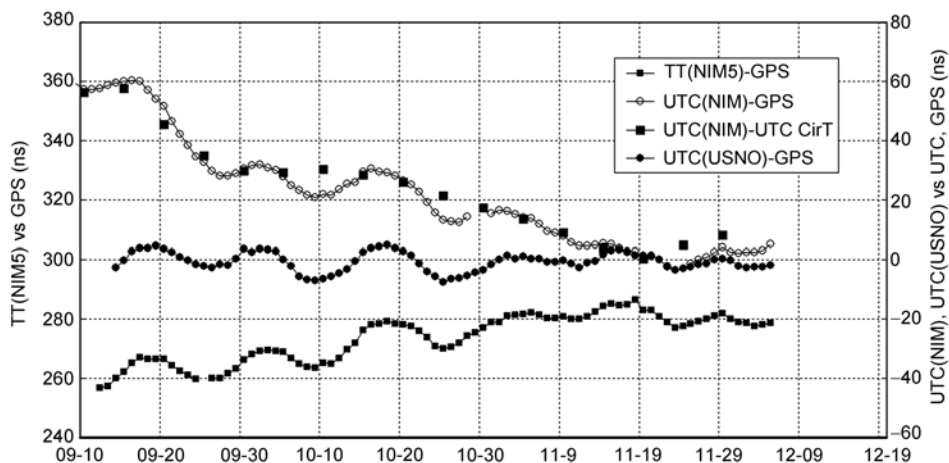


图4 NIM5 与美国海军天文台原子时 UTC(USNO)和 GPS 时间比对

进入 21 世纪中期, 美国海军天文台(USNO)提出用喷泉钟驱动地方原子时(local atomic time)的新原理. 自 2008 年起 NIM 在国际首次开展了利用铯喷泉钟直接驱动氢钟产生 NIM 原子时 TA-c(NIM)的实验^[21]. 铯喷泉钟驱动氢钟守时大大改善了 NIM 原子时的准确度和独立性, 使中国跻身世界少数几个具有独立完整时间频率体系的国家之列. NIM 的实验证明, 用喷泉钟直接驱动地方原子具有明显优越性, 代表着守时技术发展的新趋势.

时间频率计量最重要的应用莫过于卫星导航定位. 卫星导航定位的技术基础是卫星和时间频率技术的结合. 20 世纪 90 年代末, 美国的 GPS 继取得军事上的巨大成功后, 迅速进入民用, 改变了全世界时间频率的格局. 中国于 2006 年启动北斗二号卫星导航定位系统, 预计 2015 年建成覆盖全球的导航、定位和授时能力. NIM 在时间频率基准的层面为北斗地面时间频率提供技术支持, 为中国经济发展、科学研究和国防建设服务.

3 飞秒光学频率梳: 光学波长与微波频率的桥梁

直到几年前, 标准波长都是直接或间接地依靠“谐波光学频率链”溯源到微波标准频率, 不确定度在 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ 量级. 光频链是复杂、昂贵而庞大的装置, 世界上只有几家计量研究院曾经研制过. 1999 年, 德国 Max-Planck 研究所的 Hansch 小组率先实现了“飞秒(fs)脉冲激光-光子晶体光纤-自参考锁定的光学频率梳”, 一举将光波与微波“相位相干”地联系起来^[22].

2006 年 NIM 研制成功基于锁模 Ti:Sapphire 飞秒激光的光学频率梳装置, 建立起中国新一代的光学波长标准. fs 激光发出超窄激光脉冲列. 在时域重复频率 f_r 的窄脉冲列, 等价于频域严格等间隔的梳状频率列, 频率间隔为 f_r . 实际的激光脉冲不可能无限窄(fs 光梳用的 fs 脉冲宽度 ~ 20 fs), 对应频域的光频率梳覆盖范围 ~ 30 nm. 将 fs 脉冲注入一段晶体光子光纤, 高功率密度(GW/cm^2)的激光在光纤芯区发生强非线性效应, 进一步扩展光梳覆盖范围, 得到覆盖整个绿光到红外光(500~1070 nm)、超过一个倍频程的超连续光谱^[23].

fs 光梳的第 m 次模式的频率 f_m 为

$$f_m = (f_0 + m f_r), \tag{3}$$

式中 f_0 表示初始频率偏移, m 为正整数.

NIM 的 fs 光梳依照“自参考”方案, 使用 2 个锁相环(PPL)将光梳频率列的频率间隔 f_r 和初始频率偏移 f_0 分别锁定到标准微波频率(图 5), 使光梳列任意一个模的频率都锁定到微波标准^[23].

fs 光梳含 $\sim 4 \times 10^5$ 个分立模, 相当于提供 40 万个频率准确已知的稳频激光. 任何一个落在覆盖范围的波长和梳状频率列拍频, 产生差拍 $\Delta f < f_r/2$. 根据被测波长的预估值判定频率梳产生差拍的频率 f_m , 就推算出被测频率

$$f = f_m \pm \Delta f. \tag{4}$$

这意味着, 一台 fs 光梳就可以对在 500~1070 nm 光谱范围的所有光学波长进行直接溯源到标准微波频率的校准检定.

由于基于谐波逐级倍频原理, 一套光频链只能

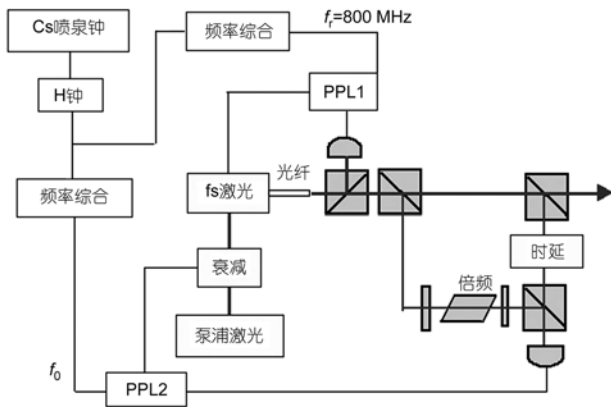


图5 NIM 飞秒光梳和自参考锁定

测量预先设计的一条特定波长。20世纪末投身于波长溯源的整整一代计量学家花费20年精力，测量出有限的几条光学波长值。现在fs光梳用半天时间，就可以测量处在覆盖范围内的任意波长，而且不确定度好得多。可以说fs光梳是一个范例：原理的突破导致大幅度简化装置结构，显著改善工作可靠性和测量准确度。fs光梳使得在常规计量条件下按(2)式间接实现米定义成为现实。从此，长度单位米从定义和实际实施都直接溯源到标准频率。

利用NIM铯喷泉钟校准氢钟H1保持标准微波频率，不确定度为 2×10^{-14} 。NIM的fs光梳锁定到H1，在国内第一次实现了光学频率直接溯源到微波频率的溯源测量，以优于 4×10^{-14} 的不确定度校准了633 nm的He-Ne激光和532 nm的Nd:YAG激光波长值^[23]。目前，NIM正在研制基于fs光纤激光的光梳，以进一步改进可靠性和延长光梳的连续工作时间。

近年国外报道了研究锁定到不同频标频率的fs光梳的性能。2000年Hansch小组^[24]首次测量了锁定到同一参考频率的两台fs光梳的频差。2004年国际计量局组织来自不同研究所的fs光梳国际比对：当锁定到同一氢钟，两台光梳的频率符合到 4×10^{-17} ；锁定到品质更好的超窄线宽超稳定激光，两台光梳的频率符合到 1×10^{-19} ^[25,26]。然而fs光梳本身只是一个从动伺服系统，锁定到参考频率源的fs光梳所产生的频率才具备频率不确定度所描述的属性。在这种意义上，fs光梳本身是一个光学“频率综合器”，评价其性能的指标应是跟踪精度。一般情况下，闭环伺服增益、闭环响应速度和锁定频率偏移决定其锁定性能。跟踪精度优秀的fs光梳锁定到一个优秀的频率

源，光梳应忠实“综合”出优秀频率；反之，跟踪精度优秀的fs光梳锁定到一个“坏”频率源，应该几乎一模一样地复现出“坏”频率。假设两台fs光梳的锁定精度都无限好，它们锁定到任何频率源都应该完全复现频率源的频率，两个光梳的频率都应该完全符合。一个好频率的频谱更纯、幅度更稳，fs光梳锁定相对容易；一个“坏”频率的频谱复杂、幅度不稳，锁定更难，fs光梳锁定效果就更差。无论如何，锁定到参考频率的fs光梳频率的稳定度和不确定度只能无限接近，而不可能超越它锁定的参考频率。

4 光钟：NIM 铯原子光晶格钟

原子钟的频率稳定度Allan方差的理论表达式可以写作^[27]：

$$\sigma_y(\tau) = \delta\nu(\tau)_{\text{rms}}/\nu = k/(2\pi Q S/N)(t_c/\tau)^{1/2} \\ = k\Delta\nu/(2\pi\nu S/N)(t_c/\tau)^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $\delta\nu(\tau)_{\text{rms}}$ 为均方根偏差， ν 为名义钟跃迁频率， k 为系数， $\Delta\nu$ 为鉴频钟跃迁线宽， S/N 为探测信噪比， τ 为取样时间， t_c 代表测量周期。

对量子噪声受限的测量：

$$S/N = n_a^{1/2}, \quad (6)$$

式中 n_a 为探测粒子数。

从(5)式可以看出，频标相对稳定性与参考线宽 $\Delta\nu$ 成正比，与名义频率 ν 和 S/N 成反比。光钟利用超稳激光探测光学频率的钟跃迁，光频比微波频率高 10^4 ，如果其他因素相同，光钟稳定度可能改善4个数量级。同时，由于光频钟跃迁能级差比微波钟跃迁能级差大，光频钟跃迁对外界干扰应该更不敏感，因而光频标可能有更好的不确定度。存储冷原子/离子的热运动速度低；存储在电磁阱(electromagnetic trap)中的单个带电离子避免了碰撞效应，同时离子的存储/探测时间长，线宽窄；而存储中性原子的原子数多， S/N 高，而原子的碰撞效应可以利用光晶格加以限制(见后文)。理论分析认为，光学频率标准具备实现 10^{-18} 不确定度的潜力。但是光波之间和光波与微波的频差测量都非常困难。fs光梳提供了一个理想的光学频率之间比对和光学频率到微波频率的下转换机构(clockwork)，为光频标的应用提供了可能。目前，美国NIST的 $^{27}\text{Al}^+$ 离子光钟不确定度达到 9×10^{-18} ^[28]，美国JILA的 ^{87}Sr 原子光晶格钟不确定度达到 1.4×10^{-16} ^[29]。国际时间频率界正在考虑“是否、如何和何时”修改秒定义。

1999年日本东京大学的 Katori 等人^[30]提出中性铯(⁸⁷Sr)原子具备作为光频标的优异特性, 2001年 Katori 等人提出用光晶格(optical lattice)隔离存储原子, 减小原子碰撞并降低原子温度, 又进一步发展“魔术波长”光晶格避免光频移^[31]. 最近, JILA 的 Ye 等人提出并证明大幅增强铯光晶格势阱中原子的相互作用, 可以有效抑制碰撞频移, 并将碰撞频移的评定不确定度降低到 10⁻¹⁷量级^[32].

NIM 从 2006 年开始研制 ⁸⁷Sr 光晶格钟, 图 6 所示为 NIM 光钟物理部分的布局. 目前已经利用 Zeeman 减速-磁光阱成功实现 Sr 原子云第一级 461 nm 蓝光冷却(囚禁 ⁸⁸Sr 原子数约为 10⁸, 原子温度约为 3 mK)^[33]和第二级 689 nm 红光冷却(蓝冷却到红冷却原子转换效率 20%, 红冷却原子温度 20~30 μK). ⁸⁷Sr 的 698 nm (¹S₀-³P₀)钟跃迁线宽~mHz^[30], 通常将激光锁定到 Fabry-Perot 超稳腔(USC)压缩线宽, 得到超窄线宽激光, 来探测钟跃迁. 2011年 NIM 实现了 698 nm 外腔半导体激光(ECLD)直接锁定到超稳腔(腔长 100 mm, 精细系数 200000), 激光线宽从锁定前约 200 kHz 压缩到<100 Hz. 由于超稳腔的隔振和隔声尚有待改进, 钟激光的线宽还有进一步减小的空间.

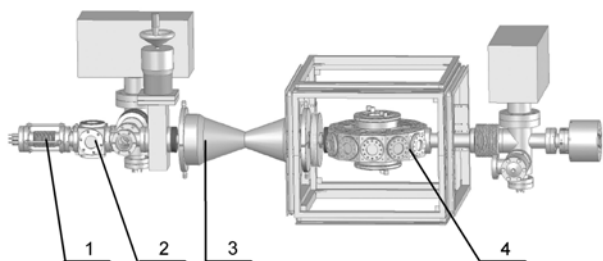


图 6 NIM Sr 光晶格钟物理部分布局(未含光晶格系统)
1, 铯炉; 2, 二维准直; 3, Zeeman 减速; 4, 磁光阱

铯原子光晶格钟提供一种工作在光学频段、高度准确而且在较短时间(以小时计)内达到其最高稳定性和不确定度的频率基准, 也带动着超稳激光、原子冷却和操控等一系列实验和技术的发展. NIM 希望在 2015 年左右实现铯光晶格钟, 应对 2019 年国际关于修改秒定义的讨论.

5 讨论

从长度单位米到时间单位秒, 总结回顾频率基准的工作原理, 其本质是将一个稳定度尽可能好、频谱尽可能纯的电磁波(光波、微波)频率锁定到一个频率准确度最好的参考谐振频率. 量子(分子/原子/离子)谐振是现代品质最优良的频率参考, 按照量子理论,

$$f = \Delta E/h, \quad (7)$$

式中 f 表示对应能级差 ΔE 的频率, h 为 Planck 常数.

理论上, 对应原子本征能级差 ΔE 的谐振频率仅由基本物理常数决定(不考虑相对论效应). 实际影响量子谐振性能的因素是多方面的. 饱和吸收或双光子吸收稳频将样品封装在吸收室内, 一系列可能引入频率偏移的物理效应均未加以修正. 铯束原子钟原子运动速度高达数百米每秒, Doppler 效应严重; 电磁波与谐振原子的作用时间比较短, 参考频率的线宽仍然比较宽; 分立的微波场引入相移频率偏差. 铯喷泉原子密度高达 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 原子碰撞和黑体辐射成为限制进一步改善不确定度的障碍. 表 2 列出基于四类原理建立的频率标准可能达到的频率极限不确定度的数量级估计.

任何实际物理系统都不是“理想”的. 样品室-粒子束-冷原子喷泉-冷原子/离子存储, 一部量子频率标准的历史就是不断排除对参考样品的干扰, 朝向理想条件的持续追求.

表 2 吸收室-原子束-冷原子喷泉-存储冷原子/离子频标的不确定度极限估计

原理	主要极限误差源	FWHM 线宽 $\Delta\nu$ (Hz)	名义频率 ν (Hz)	$Q=\Delta\nu/\nu$	不确定度极限
吸收室	Doppler 效应、碰撞效应、光频移、样品不纯等	1×10^6	5×10^{14}	5×10^9	10^{-13}
原子束	Doppler 效应、微波腔相位差等	5×10^1	1×10^{10}	2×10^8	10^{-15}
冷原子喷泉	原子碰撞、黑体辐射等	1	1×10^{10}	1×10^{10}	10^{-16}
原子/离子存储	量子噪声等	1×10^{-2}	5×10^{14}	5×10^{16}	10^{-18}

致谢 本文基于 NIM 几代科研人员的研究成果, 在这里向所有做出贡献的 NIM 和协作单位的同事致以衷心感谢。

参考文献

- 1 CIPM Recommendation 1 (CI-2002): List of recommended radiations. *Metrologia*, 2003, 40: 104–115
- 2 17th CGPM. Resolution 1 (CR.97): Definition of the metre (1983). *Metrologia*, 1984, 20: 25–30
- 3 沈乃澄, 吴耀祥, 孙义民, 等. 碘饱和和吸收稳定的氦氖激光器. *计量学报*, 1980, 1: 93–101
- 4 赵克功, 李成阳, 李华, 等. 碘-127 稳频 640 nm 氦氖激光器的研究. *计量学报*, 1987, 8: 88–95
- 5 Liu Z, Qian J, Lin Z, et al. Frequency stabilized 543 nm He-Ne laser. *Digest CPEM'98*, 1998. 253
- 6 李天初, 钱进, 张小平, 等. 1.5 μm 波长 DFB 半导体激光乙炔($^{12}\text{C}_2\text{H}_2$)线性吸收稳频. *计量学报*, 2001, 22: 161–163
- 7 臧二军, 曹建平, 李成阳, 等. 半非平面单块激光器快速频率调谐的实验研究. *中国激光*, 2004, 31: 931–933
- 8 13th CGPM. Resolution 1 (CR.103): SI unit of time (second). *Metrologia*, 1968, 4: 41–45
- 9 Rabi I, Millman S, Zacharias J, et al. The molecular beam resonance method for measuring nuclear magnetic moments: The magnetic moments of ^6Li , ^7Li and ^{19}F . *Phys Rev*, 1939, 55: 526–535
- 10 Essen L, Parry J. Atomic standard of frequency and time interval. *Nature*, 1955, 176: 280–284
- 11 Ramsey N. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields. *Phys Rev*, 1950, 78: 695–699
- 12 Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J, et al. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 48–51
- 13 Zacharias J, Yates G, Haun R. An atomic frequency standard. *Proc IRE*, 1955, 43: 364–368
- 14 Clairon A, Laurent P, Santarelli G, et al. A cesium fountain frequency standard: Preliminary results. *IEEE Inst Meas*, 1995, 44: 128–131
- 15 Parker T. Long-term comparison of caesium fountain primary frequency standards. *Metrologia*, 2010, 47: 1–10
- 16 李天初, 李明寿, 林平卫, 等. 新一代时间频率基准: NIM4 铯冷原子喷泉钟. *计量学报*, 2004, 25: 193–197
- 17 Li T, Li M, Lin P, et al. Improvements and new evaluation of NIM4 cesium fountain clock in 2005 and construction of NIM5 clock. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 1177–1179
- 18 Li T, Li M, Lin P, et al. The transportable cesium fountain clock NIM5: Its construction and performance. In: *Proceedings of the 7th Frequency Standards and Metrology*, 2008. 314–320
- 19 王立吉, 吴长华, 黄秉英, 等. NIM 铯原子喷泉频率基准的设计与初步结果. *计量学报*, 2000, 21: 1–5
- 20 Li T, Li M, Lin P, et al. NIM4 cesium atomic fountain primary frequency standard: Performance and evaluation. *IEEE UFFC-FCS2004*, 2004. 431–432
- 21 Gao Y, Gao X, Li T, et al. The generation of new TA(NIM), which is steered by NIM5 cesium fountain clock. *Metrologia*, 2008, 45: 34–37
- 22 Udem T, Reichert J, Hansch T, et al. Accurate measurement of large frequency differences with a mode-locked laser. *Opt Lett*, 1999, 24: 881–883
- 23 方占军, 王强, 李天初. 飞秒光梳和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量. *物理学报*, 2007, 56: 5684–5690
- 24 Holzwart R, Udem T, Hansch T, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2264–2267
- 25 Ma L, Bi Z, Diddams S, et al. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level. *Science*, 2004, 303: 1843–1845
- 26 Ma L, Robertsson L, Zucco M, et al. First international comparison of femtosecond laser combs at the international bureau of weights and measures. *Opt Lett*, 2004, 29: 641–643
- 27 Hollberg L. Optical frequency standards and measurements. *IEEE J Quant Electr*, 2001, 37: 1502
- 28 Chou C, Hume D, Rosenband T, et al. Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ clocks. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 070802
- 29 Campbell G K, Ludlow A D, Ye J, et al. The absolute frequency of the ^{87}Sr optical clock transition. *Metrologia*, 2008, 45: 539–548
- 30 Katori H, Ido T, Isoya Y, et al. Magneto-optical trapping and cooling of strontium atoms down to the photon recoil temperature. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 1116–1120
- 31 Tokamoto M, Katori H. Spectroscopy of the $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$ clock transition of ^{87}Sr in an optical lattice. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 223001
- 32 Swallows M, Bishof M, Ye J, et al. Suppression of collisional shifts in a strongly interacting lattice clock. *Science*, 2011, 311: 1043–1046
- 33 Wang S K, Wang Q, Lin Y G, et al. Cooling and trapping ^{88}Sr atom with 461 nm laser. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 093202

From meter to second at NIM: Stabilized lasers - Cs fountain clocks - fs optical frequency combs - Sr lattice clock

LI TianChu & FANG ZhanJun

National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

In this paper we report the recent progresses on the time and frequency primary standards at the National Institute of Metrology (NIM) China: stabilized lasers for practical realization of the length unit (meter) of the International System of Units (SI); the cesium fountain clocks to realize the SI time unit (second) with an uncertainty of 2×10^{-15} ; the femto-second optical frequency combs, establishing the coherent connection between microwave frequency and optical frequency, to calibrate the optical wavelengths traceably to the microwave standard frequency with uncertainty better than 4×10^{-14} ; and the construction of a Sr lattice optical clock as a candidate of possible future redefinition of the second. We also describe: (1) fs optical combs are serve-locking systems and the specification to characterize their performance should be their tracking precision; (2) the estimated uncertainty limitations of sample cell - atom beam - cold atom fountain - trapped atom/ion frequency reference techniques.

metrology, time and frequency standard, stabilized laser, atomic fountain clock, optical clock, fs optical frequency comb

doi: 10.1360/972011-220