

基于 Ramsey 干涉的小型化冷原子微波钟研究进展

张炯阳¹, 肖玉华^{1*}, 王 骥¹, 李 慧², 高望远¹, 张文玺¹, 陈 江¹, 刘志栋¹

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000;

2. 国营洛阳丹城无线电厂, 河南 洛阳 471000)

摘要: 基于 Ramsey 干涉的冷原子钟已被证实具有很高的稳定性和准确度。经过近 30 年的发展, 冷原子钟技术水平不断提高, 运行可靠性不断提升, 并逐步在便携式和可移动时频系统上得到应用, 冷原子钟的小型化已成为该领域的研究热点。阐述了基于 Ramsey 干涉的冷原子微波钟的工作原理及运行过程, 分析了冷原子钟小型化的关键技术, 梳理了目前小型化冷原子钟的研究进展, 表明了基于腔内冷原子制备的原位干涉技术是实现冷原子钟小型化的有效途径, 由此发展的冷原子钟兼具高性能、高可靠、高集成化等优势。

关键词: 冷原子钟; Ramsey 干涉; 频率测量; 小型化

中图分类号: TH714.1¹4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)05-0484-12

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.05.004

Research Progress of Miniaturized Cold Atom Microwave Clocks Based on Ramsey Interrogation

ZHANG Jiongyang¹, XIAO Yuhua^{1*}, WANG Ji¹, LI Hui², GAO Wangyuan¹, ZHANG Wenxi¹, CHEN Jiang¹, LIU Zhidong¹

(1. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,

Lanzhou 730000, China; 2. State-Run Luoyang Dan City Radio Power Plant, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: The cold atom clock based on Ramsey interrogation has been proved to have high stability and accuracy. After nearly 30 years of development, the technology maturity and the reliability of the cold atom clocks are improved, and it has been gradually applied in portable time-frequency systems. The miniaturization of cold atom clock thus becomes a research hotspot in this field. The working principle and operation process of cold atom microwave clock based on Ramsey interrogation are expounded. The key technologies and the research status of miniaturization of cold atom clock are analyzed and reviewed, respectively. It is shown that the in-situ interrogation technology based on the preparation of cold atoms in the cavity is an effective way to realize the miniaturization of cold atom clock, which will make the cold atom clock has the advantages of high performance, high reliability and high integration.

Key words: cold atom clock; Ramsey interrogation; frequency measurement; miniaturization

0 引言

高精度时频测量技术在基础物理研究、航空航天、电力通信、导航定位等领域都具有非常广泛的应用^[1-4]。从日晷、沙漏到冷原子钟、光钟, 高精

度时频测量装置一直是人们追求的目标。1949 年, Ramsey^[5]提出了分离振荡场技术, 相比 Rabi 提出的分子束磁共振技术, 该技术延长了原子与辐射场相互作用的时间, 能够获得更窄的共振频率线宽。1967 年, 国际计量大会通过了时间单位“秒”重新

收稿日期: 2024-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2341247); 中国航天科技集团有限公司钱学森青年基金; 甘肃省领军人才计划资助项目(2023-LJRC II-366)

作者简介: 张炯阳, 工程师, 主要从事冷原子技术与精密测量研究。E-mail: zhangjy529@126.com

通信作者: 肖玉华, 高级工程师, 主要从事冷原子技术研究。E-mail: yhxiao2004@sina.com

引文信息: 张炯阳, 肖玉华, 王骥, 等. 基于 Ramsey 干涉的小型化冷原子微波钟研究进展[J]. 真空与低温, 2024, 30(5): 484-495.
ZHANG J Y, XIAO Y H, WANG J, et al. Research progress of miniaturized cold atom microwave clocks based on Ramsey interrogation[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(5): 484-495.

定义的决议,将“ ^{133}Cs 原子基态两个超精细能级间跃迁所产生电磁波连续振荡 9 192 631 770 个周期所持续的时间”定义为单位“秒”,由此秒的定义从“历书秒”改为“原子秒”,至今仍在使用。

热原子因高速运动引入的多普勒频移及两次经过微波腔引入的分布腔相位频移限制了原子钟频率准确度的提升。为了进一步提高频率测量准确度,麻省理工学院的 Zacharias 教授提出利用铯原子束实现原子喷泉,但是由于铯原子束的扩散速率达到了 100 m/s 的量级,严重的原子数损耗最终导致实验以失败告终^[6]。直到 1989 年,朱棣文研究小组在斯坦福大学利用激光将钠原子冷却至 50 μK ,实现了原子喷泉,由此获得的 Ramsey 谱线中心条纹线宽仅为 2 Hz^[7]。1991 年,法国巴黎天文台的 Clairon 等^[8-10]通过 Moving Molasses 技术将冷原子团上抛,并在 1995 年将 Ramsey 谱线中心条纹线宽进一步压窄到 0.7 Hz,实现了真正意义上的冷原子喷泉钟,频率稳定度达到 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$,经评估后频率准确度达到 3×10^{-15} 。冷原子钟一经实现,稳定度、准确度等指标就超过了当时性能最好的铯束热原子钟,受到了各国研究人员的高度关注。

针对冷原子微波钟的研究可以分为两大方向:高精度喷泉型冷原子钟和小型化集成式冷原子钟。高精度喷泉型冷原子钟中,原子两次与微波脉冲作用的时间达到数百毫秒,鉴频谱线宽度为 Hz 或亚 Hz 量级,在频率稳定度和准确度上具有非常显著的优势。经过 30 多年的技术发展和改进,冷原子喷泉钟的短期稳定度达到了 $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,频率不确定度也减小至 1.1×10^{-16} ^[11-12]。但是高精度喷泉型冷原子钟体积和质量比较大,通常作为实验室的基准钟或者守时钟。虽然已有多个研究小组实现了可搬运的高精度喷泉型冷原子钟^[12-13],但仍难以满足时频测量和传递对装置小型化、轻量化的需求。

近年来,随着科学技术的发展和测量性能要求的提高,卫星定位系统、深空探测器等对小型化高精度时频测量装置的需求日益强烈,高性能、高可靠、低成本、集成化的冷原子钟成为研究热点。例如,导航卫星对原子钟的体积、质量有严格的限制,而冷原子钟(尤其是冷原子喷泉钟)体积大、结构复杂,目前卫星上实际应用的仍然是传统热原子钟^[14]。因此,近年来多个国家的研究机构开展了冷原子钟小型化的研究工作。

本文首先介绍冷原子钟的测量过程和 Ramsey

干涉的基本原理。从小型化冷原子制备系统、高性能微波腔、高可靠集成化光学系统三个方面对冷原子钟小型化的关键技术进行梳理,介绍目前小型化冷原子钟的研究现状,并对小型化冷原子钟的发展进行展望。

1 冷原子钟运行过程及工作原理

冷原子钟可分为喷泉型和自由落体型。以铷原子喷泉钟为例,基于冷原子 Ramsey 干涉的频率测量的典型过程如图 1(a)所示,大致可以分为:原子冷却和上抛、初态制备、Ramsey 干涉、末态探测以及钟信号锁定五个阶段。首先,通过磁光阱(Magneto-Optical Trap, MOT)从背景蒸气或低速原子流中完成冷原子的制备,原子温度此时仍然高达 150 μK 左右。为了进一步降低原子温度,需改变上、下对射激光束的频率。原子由于感受到的辐射光压不平衡会被以一定速度 Δv 上抛,原子上抛的速度 Δv 与激光频率失谐 $\Delta\omega$ 、激光波矢 k 的关系为 $\Delta v = \sqrt{3}\Delta\omega/2k$ 。原子被上抛后,通过降低激光功率、增大激光失谐,将原子的温度进一步降低至几个 μK 。为了减小外界磁场对原子能级的影响,当原子经过选态腔时,处于 $|F=2, m_F=0\rangle$ 态的原子在微波的激励下跃迁至 $|F=1, m_F=0\rangle$ 态,其余处于 $|F=2, m_F \neq 0\rangle$ 态的原子在通过选态腔后用激光将其吹走。原子继续向上飞行,上下两次经过 Ramsey 腔并与微波发生相互作用,在微波激励下完成 Ramsey 干涉后,原子处在 $|F=2, m_F=0\rangle$ 和 $|F=1, m_F=0\rangle$ 的叠加态上。原子落回探测区后,通过双能级荧光探测的方法得到基态两个能级上原子的数目,从而得到跃迁概率 P 。

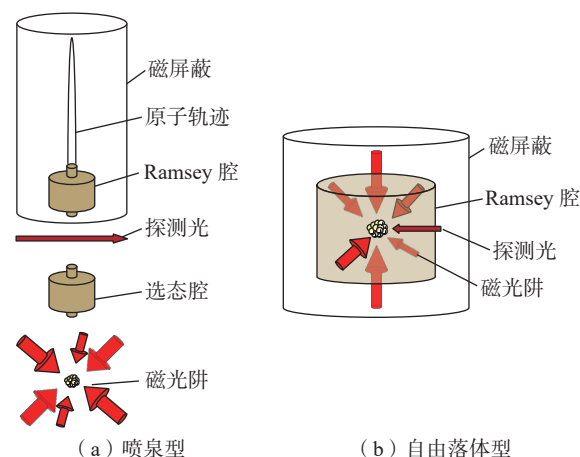


图 1 冷原子钟测量过程示意图

Fig. 1 The diagram of measuring process of cold atom clock

自由落体型冷原子钟与喷泉型冷原子钟的运行过程有所不同,冷原子在制备后不再被抛射,而是直接撤去囚禁激光使原子作自由落体运动。在原子下落的过程中施加间隔为 T 的微波脉冲,使原子完成 Ramsey 干涉。原子的末态概率分布可由双能级荧光探测的方法得到,或者使用单束光探测的方式获得^[15]。后者在探测过程中原子数目的损耗

$$P = 4 \left(\frac{\Omega}{\Omega'} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\Omega' \tau_p}{2} \right) \left[\cos \left(\frac{\delta T}{2} \right) \cos \left(\frac{\Omega' \tau_p}{2} \right) - \frac{\delta}{\Omega'} \sin \left(\frac{\delta T}{2} \right) \sin \left(\frac{\Omega' \tau_p}{2} \right) \right]^2 \quad (1)$$

式中: τ_p 为微波与原子的作用时间; T 为两次微波作用之间的时间间隔; Ω 为拉比频率; δ 为微波频率相对于原子跃迁频率的失谐量; $\Omega' = \sqrt{\Omega^2 + \delta^2}$ 是有效拉比频率。在中心条纹附近有 $\delta \ll \Omega$, 式(1)可以写为:

$$P \approx \frac{1}{2} [\cos(2\pi\delta T) + 1] \quad (2)$$

处在 Ramsey 干涉花样中心条纹处的半高全宽(即中心条纹线宽)为:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2T} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,原子在两次微波作用之间自由飞行的时间 T 越长, Ramsey 中心条纹线宽越窄,也越有利于高性能冷原子频标的获得。得到 Ramsey 干涉条纹之后,通过半高宽锁定的方法将微波频率锁定到原子的跃迁线上,最终实现钟信号的锁定^[16]。根据文献[17],冷原子钟的稳定度可由式(4)预测:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{\pi C} \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{S_{\text{SNR}}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \quad (4)$$

式中: C 和 S_{SNR} 分别为 Ramsey 干涉条纹的对比度和信噪比; ν_0 为钟跃迁频率; T_c 为单次测量的时间; τ 为平均时间。由式(4)不难看出,提高干涉条纹的对比度和信噪比、增加 Ramsey 干涉时间以及减小单次测量时间能够有效提高冷原子钟的性能。

2 冷原子钟小型化的关键技术

冷原子钟由真空物理系统、激光光学系统、微波频率链路、电子控制系统等子系统组成,每个子系统的结构和功能都比较复杂。在用于守时授时或者基础研究时,会重点提高冷原子钟的频率稳定度、不确定度等性能,并不会特别关注冷原子钟的体积。实验室中的高精度喷泉型冷原子钟的高度通常超过 1 m,在实际应用时,大型装置的移动性和可靠性不能得到保证。因此,在确保性能的前提

较小,使用重捕获技术能够大幅提高冷原子钟的采样率。由于原子在下落的短时间内完成了整个冷原子钟的测量过程,且原子团的位移仅仅只有几个毫米,因此 Ramsey 干涉可以在很小的空间中实现,如图 1(b)所示,冷原子钟的紧凑性也得到了进一步的提升。

跃迁概率 P 的表达式可以写为式(1):

下对冷原子钟进行小型化设计研制,是冷原子钟能够得到更广泛应用的重要前提。本文梳理了三项冷原子钟小型化的关键技术,下面分别对其进行详细介绍。

2.1 小型化冷原子制备系统

为了在三维空间上冷却原子, MOT 的形成需要在三个方向上对射且正交的 6 束激光,同时利用一对反亥姆赫兹线圈来产生空间的梯度磁场,这使得 MOT 的体积通常比较大。为了使 MOT 更加紧凑,研究人员提出了不同的小型化方案,冷原子钟的体积被减小至立方厘米尺度,功耗也较传统 MOT 降低了很多^[18-19]。

1996 年, Lee 及其同事提出了中空金字塔形(PMOT)和中空圆锥形(CMOT)的 MOT 结构,这种中空结构的顶部角度为 90° , 当一束圆偏振激光沿轴向入射到 PMOT 内表面后,激光会在内部反射并产生径向激光和沿轴方向的反射激光,从而自动满足原子囚禁所需的激光方向和偏振^[20-21],如图 2(a)所示。Pollock 等^[22-23]在硅片上刻蚀了 3~9 mm 的 PMOT 阵列,并研究了囚禁原子数目与金字塔结构边长大小的关系。Vangeleyn 等^[24]利用三个偏角为 22.5° 的反射镜,单个入射光经反射镜反射后在空间上被分割成 3 束呈 45° 向上的光束,从而将原子囚禁在 4 束激光的重叠区域中,得到了与 PMOT 类似的效果。Reichel 等^[25]在早期还实现了一种镜子磁光阱(mirror-MOT),通过微加工的载流导体产生的磁场操纵中性原子,使用 4 束激光实现了冷原子的高效装载,原子数目可以达到 5×10^6 个。Vangeleyn 等^[26]提出利用衍射光栅将四面体 PMOT 扩展到“平面”,光栅磁光阱(GMOT)具有与 PMOT 十分相似的工作原理,主要的区别是光栅能够在空间上压缩光束并增加衍射光的强度,如图 2(b)所示。通过优化,在 GMOT 中囚禁的原子数目达到了 6×10^7 个^[27]。Lewis 等^[28]还在 GMOT

上实现了冷原子喷泉, 允许最长 100 ms 的 Ramsey 干涉。为了提高光栅的衍射效率, 中国计量院的 Duan 等^[29]在 GMOT 的硅基底上镀金膜后, 芯片的衍射效率超过 40%, 捕获的原子数达到 2.8×10^7 个。原子芯片中使用 U 型或 Z 型导线来产生梯度磁场, 但实现原子冷却囚禁仍然需要外部亥姆霍兹线圈来提供偏置场^[23]。Chen 等^[30]将用于产生梯度磁场的

线圈集成到光栅芯片上, 这种平面集成的 piMOT 为冷原子系统的进一步芯片化集成提供了可能性。1979 年, 王育竹先生提出利用积分球漫反射光减速原子的想法, 后来在实验上得到了验证^[31-33]。这是一种全光冷却的方式, 冷原子制备过程中不需要梯度磁场, 而且对激光束对准的要求也较低, 降低了装置的复杂性, 如图 2(c) 所示。

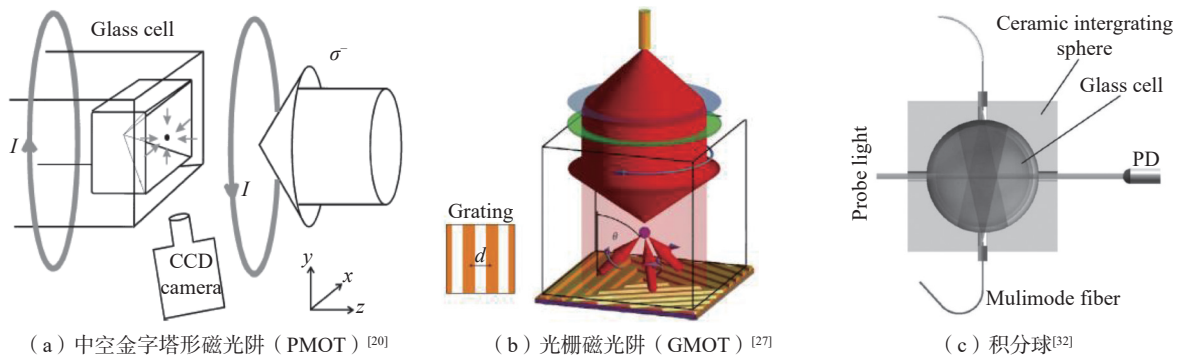


图 2 小型化冷原子制备系统

Fig. 2 Miniaturized cold atom preparation system

2.2 高性能微波腔

Ramsey 干涉是原子受外部微波磁场激发发生的磁偶极跃迁。微波谐振腔是具有储能和选频特性的微波元件, 是较为理想的微波场的产生方式, 能够提供与原子作用的微波场。在与原子发生作用时, 微波腔的谐振频率要与原子基态的超精细结构分裂保持一致, 以减小腔牵引频移^[34]。在微波模式下, 冷原子钟常用的是 TE_{011} 模^[12] 或者类 TE_{011} 模^[35], 这两种模式下的磁场沿轴线方向且集中在中心轴线处。品质因子 Q 是微波腔的一个重要参数, Q 值越高微波腔的损耗越小。此外, 微波腔产生的微波场的幅度和相位也要求尽可能均匀, 幅度不均匀的微波场在与原子团的自由扩散相耦合后, 会极大降低 Ramsey 干涉条纹的对比度^[36], 相位不均匀也会引入系统误差。因此, 设计并研制高性能微波腔是实现冷原子钟的重要保证。

中国科学院上海光机所于 2016 年发射到太空的冷原子钟, 其微波腔是基于环形腔的矩形波导腔。微波信号沿两个导波区传输, 并在每个微波作用区形成 TE_{201} 模的驻波场。因此, 单向飞行的冷原子与空间分离的微波场相互作用两次^[37]。这种环形腔机械结构稳定, 但由于原子经过空间分离的微波

腔作用, 存在不可忽视的分布腔相位频移。Bian 等^[38]还提出一种可以在空间中应用的移动型微波腔, 以减小纵向腔相位频移, 但对微波腔运动的定位精度、位置重复性等提出了较高的要求。

柱形腔由于其结构简单、便于加工等优点^[39], 是冷原子钟常用的微波谐振腔结构^[40-43]。通常由无氧铜加工制成, 通过控制腔体尺寸并优化微波腔结构, 可以抑制非 TE_{011} 模的干扰。柱形腔两个端盖处微波场分布较弱, 在其中心开孔以使原子通过, 微波腔的 Q 值一般在 10 000 左右。但是在特定使用频率下大幅缩小柱形腔的体积比较困难, 无法满足冷原子钟进一步小型化的研制需求。

Lee 等^[44]提出将环隙腔运用到冷原子钟, 环隙腔的磁场分布与柱形腔的 TE_{011} 模式类似, 其谐振频率由内、外环直径、间隙数量、间隙宽度和电极厚度决定, 但腔的体积比相同共振频率的柱形腔小。通过优化设计, 在环隙腔上开了 10 个用于激光通过的孔后, 该腔的实测 Q 值仍能达到 2 100。这种环隙腔结构也被多个研究小组用来实现冷原子钟小型化^[45-46]。巴黎天文台使用无氧铜材质设计并研制了球形微波腔, 微波场是 TE_{011} 模, 腔的频率经过调节后与 Cs 原子基态能级共振, Q 值约 3 000^[47]。各种微波腔结构如图 3 所示。

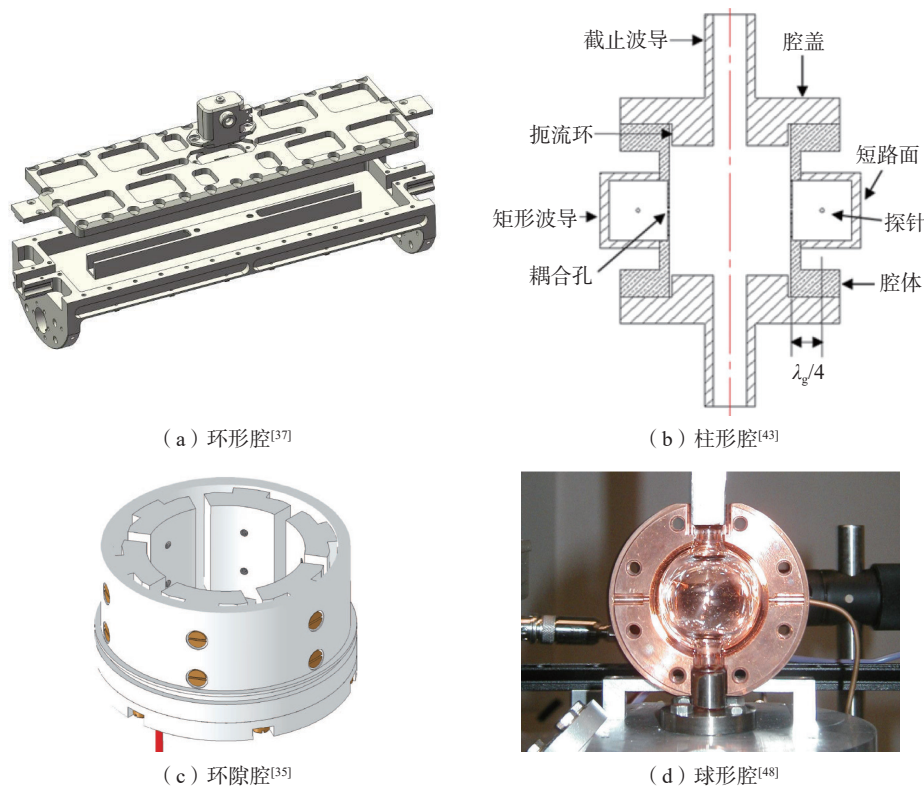


图 3 不同结构的微波腔

Fig. 3 Microwave cavities with different structures

2.3 高可靠集成化光学系统

光学系统是冷原子钟的重要组成部分之一,用于操控与探测原子。在功能实现上,光学系统需要提供冷却光、回泵光、探测光等激光光束,在部分实验中还用到了泵浦光来提高原子的利用率^[49]。为了确保冷原子钟的性能,光学系统还对激光的频率、功率、偏振稳定性提出了一定的要求,例如,频率稳定度为 $10^{-13}\tau^{-1/2}$ 的冷原子钟要求激光的频率稳定度在 1~10 000 s 内优于 10^{-11} ^[50]。而在实际环境中,温度、振动、冲击、应力等都会恶化光学系统的稳定性,并最终影响冷原子钟的性能。在空间实验中对光学系统的可靠性和集成化程度的要求更高。因此,设计并实现高可靠集成化光学系统是冷原子钟小型化的重要内容。

中国科学院上海光机所为空间⁸⁷Rb 冷原子喷泉钟研制了一套集成化光学系统,所有的光学和电子元件都集成在一个 300 mm×290 mm×30 mm 的光学平台上,如图 4(a)所示,紧凑的光学结构和特殊的热设计保证其能够通过所有空间环境鉴定试验^[51]。该光学系统自 2016 年发射后已在轨运行 34 个月,性能得到了充分验证^[52]。针对可长期自

主轨道运行的下一代导航定位系统,中国科学院上海光机所还研制了用于¹³³Cs 积分球冷原子钟的小型化光路,并完成了环境模拟实验^[52]。巴黎天文台为空间冷原子钟 PHARO 研制的光学系统,光学元件安装在双面光学工作台上,工作台通过阻尼器减小来自外部环境的剧烈振动^[53]。

法国 ONERA 的 Lienhart 等^[54]还提出将通信波段的 1 560 nm 激光倍频至 780 nm,并用于⁸⁵Rb 冷原子的制备,光路原理如图 4(b)所示。所用光纤器件体积小,并且避免了空间光路的对准和耦合问题,光路可靠性和集成性有了明显提高。Ménoret 等^[55]也通过倍频的方式产生实验用的 780 nm 激光,所有光路被集成到 45.72 cm(18 英寸)标准机箱中,通过在微重力环境下的抛物飞行,对该光路在温度变化、振动、冲击条件下的鲁棒性进行了验证,该光路系统后来也被应用到了商业冷原子钟。王新文等^[56]利用 1 560 nm 激光倍频的方式产生用于冷原子钟的 780 nm 激光,光源部分采用光纤激光器、光纤放大器、光纤倍频晶体等光纤器件实现,激光线宽和短期稳定度有了极大的改善。

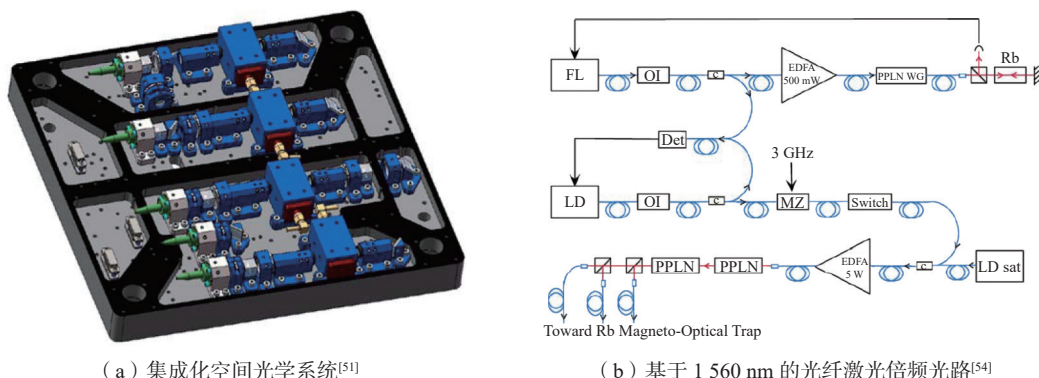


图 4 集成化光学系统

Fig. 4 Integrated optical system.

3 小型化冷原子钟研究现状

法国巴黎天文台在研制铯原子喷泉钟后不久,就开始为欧空局 ACES 项目研制空间冷原子钟 PHARAO, 预期在轨运行频率稳定度达到 $10^{-13} \tau^{-1/2}$, 准确度为 10^{-16} ^[53], 提高了空间钟组的长期稳定度。与地面喷泉钟不同的是, 微重力环境下的冷原子经抛射之后做直线运动, 与空间分离的微波场作用后被探测。PHARAO 在 1997 年完成了抛物线飞行试验的模拟微重力实验, 实现 7 Hz 线宽的干涉条纹^[57], 地面实测的典型频率稳定度为 $3.2 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ^[58]。

为了研制出在地面运行性能接近原子喷泉的小型化冷原子钟, 2001 年巴黎天文台开始了名为 HORACE 的各向同性冷却冷原子钟项目, 原子钟结构如图 5 所示^[59]。HORACE 的所有过程都在球形铜微波腔内完成, 腔壁抛光处理后反射率达到 96%。冷却和回泵光由 6 根多模光纤注入积分球, 激光经积分球内壁多次反射后形成冷却光场, 能够在 40 ms 内制备 10^7 个原子, 经亚多普勒冷却后原子的温度降低至 5 μ K。通过对完成探测的冷原子重新捕获, 可以减少原子制备的“死时间”, HORACE 的采样率提升至 12 Hz, 短期稳定度达到 $2.2 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 20 000 s 时稳定度为 3.2×10^{-15} ^[15, 59]。

巴西圣保罗大学提出在柱形微波腔上开孔以实现冷原子钟的小型化。通过在柱形腔的腔壁和端盖上开设通光孔, 形成 MOT 的 6 束激光可以穿过微波腔并在腔中心汇聚, 实现冷原子的制备, 如图 6 所示^[60]。完成 $T=8$ ms 的 Ramsey 干涉之后的原子再由囚禁激光进行探测, 获得的干涉条纹对比度为 80%。微波腔和 MOT 进行了一体化设计, 微波腔的 Q 值也能达到 1 600。利用该小型化冷原子钟实现的频率测量, 积分时间大于 100 s 后的频率稳定度为 $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 。

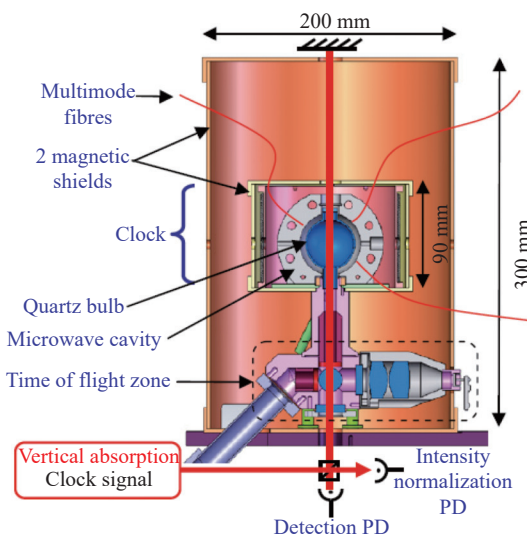


图 5 HORACE 物理结构图

Fig. 5 Physical structure of HORACE

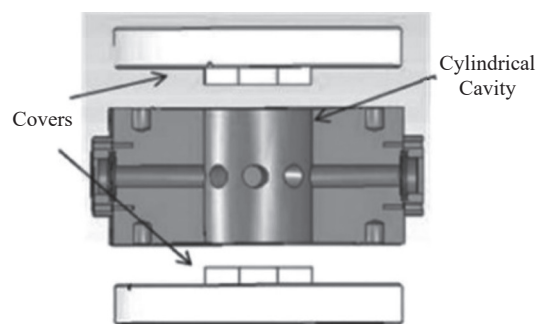


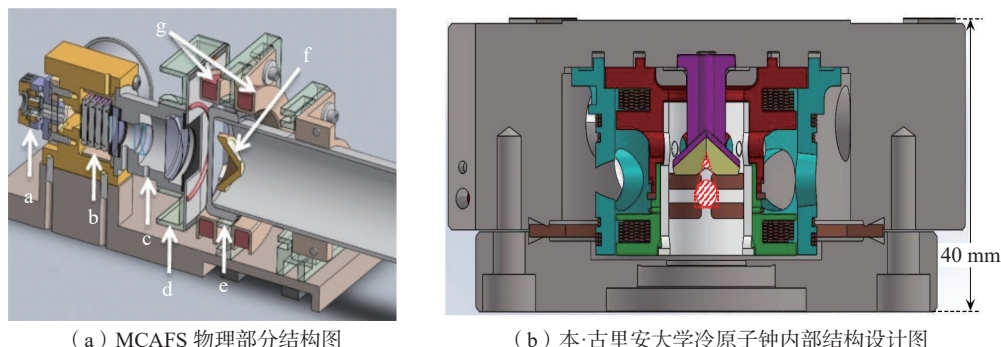
图 6 腔内磁光冷却冷原子钟

Fig. 6 The cold atom clock based on intracavity magneto-optical cooling

美国国防部高级研究计划局(DARPA)的微型 PNT 计划曾研制了一个微型冷原子频率标准装置(MCAFS), 该装置利用 CMOT 制备冷原子, 其内部结构的设计剖面如图 7(a)所示, 图中 a~f 分别代表激

光器、光开关、扩束透镜、用于荧光收集的光电管、真空腔、铜制 CMOT 和磁场线圈, 整个物理部分的体积仅为 81 cm^3 。实验过程使用重捕获技术将冷原子钟的采样率提升至 10 Hz , 频率稳定度为 $1.1 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ ^[61]。以色列本·古里安大学的 Givon 等^[62] 也使用 PMOT 来减小装置的体积, 并用环隙腔产生微波场。如图 7(b)所示为钟内部结构的设计图, 图中灰色部

分为钛真空腔体, 红褐色部分为铜制环隙腔、激发环和线圈, 金色的部分为中空角锥反射结构。通过模拟仿真环隙腔中磁场的分布, 得到内部直径为 17 mm 、上下两端为开放结构的微波腔, 冷原子钟的物理部分被封装到一个直径为 155 mm 、高度为 117 mm 的圆柱体中, 可被集成到 3U 的标准机箱中。原子钟的天稳定度有望达到 2×10^{-14} 。



(a) MCAFS 物理部分结构图

(b) 本·古里安大学冷原子钟内部结构设计图

图 7 基于中空锥形 MOT 的小型冷原子钟

Fig. 7 Minutized cold atom clock based on a hollow-pyramidal/conical MOT

英国思克莱德大学结合光栅芯片和环隙腔技术以实现冷原子钟小型化, 其结构示意图如图 8 所示^[45], 物理部分体积仅 67 cm^3 。光栅芯片为一块 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的平面结构, 囚禁光从顶部入射到芯片表面, 达到稳态时该芯片可以在 100 ms 内制备超过 3×10^6 个原子。微波环隙腔由一个具有四电极几何结构的环隙结构组成, 其外部半径和高度均为 44 mm , 该环隙腔通过增材制造 (Additive Manufacturing) 的方式获得。冷原子钟的采样率为 7 Hz , 受限于 Ramsey 条纹的信噪比 ($\text{SNR}=110$), 线宽为 50 Hz 时冷原子钟的稳定度为 $1.5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 。Batori 等^[46] 也采用相似的方案实现小型化冷原子钟, 冷原子钟的稳定度为 $4.4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 。

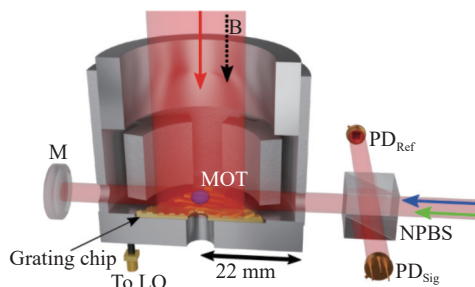


图 8 光栅芯片冷原子钟

Fig. 8 Cold atom clock based on gating chip

欧美国家利用积累的成熟技术, 已经研制出多款商品化的小型冷原子钟。法国 SYRTE、LP2N 和 Muquans 公司 (后被 iXBlue 收购) 在 2011 年合

作启动了名为 Rubiclock 的原子钟研制项目, 该项目仍然使用与巴黎天文台 HORACE 类似的物理结构, 如图 9(a)所示^[63-64], 原子种类由 Cs 原子换成了碰撞频移更小的 Rb 原子, 研制的小型化冷原子钟短期频率稳定度可达 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 长期稳定度优于 1×10^{-15} , 体积约为 700 L , 质量为 135 kg 。美国 DARPA 的 Portable Microwave Cold Atomic Clock 计划为研制小型便携式冷原子钟, Spectra Dynamics 公司为该计划研制了一款小型化冷原子钟, 如图 9(b)所示^[65], 通过激光捕获、冷却⁸⁷Rb 原子, 将原子制备到 $F=1$ 超精细基态上后, 原子进入微波腔并与微波相互作用。该钟的体积为 $22 \text{ cm} \times 37 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$, 质量为 28 kg , 短期频率稳定度为 $8 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 天稳定度达到 3×10^{-15} 。美国 AOSense 公司基于⁸⁷Rb 原子研制的冷原子钟, 如图 9(c)所示^[66], 频率测量短期稳定度达到 $5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 频率准确度优于 3×10^{-15} 。

我国在原子钟研制方面取得了重要的突破, 北京大学、中国科学院武汉精测院、兰州空间技术物理研究所、成都天奥电子等单位研制的 Rb 原子钟和 Cs 原子钟的性能已经接近甚至超越国外同类产品^[67-70]。20 世纪 90 年代, 随着冷原子技术引进中国, 中国科学院上海光机所^[37, 42]、中国科学院国家授时中心^[71-72]、中国计量科学研究院^[73-74]、华中科技大学^[16]、北京无线电计量测试研究所^[75]和兰州空间技术物理研究所等多个研究单位相继开展了相关技术研究, 并取得了一系列重要的研究进展。



图 9 商品化冷原子钟
Fig. 9 Commercial cold atom clocks

在冷原子钟小型化方面,中国科学院上海光机所经过 10 多年的努力完成了空间冷原子钟 CSAC 的研制,如图 10 所示^[37]。该钟于 2016 年 9 月 15 日随我国“天宫二号”空间实验室成功发射并顺利进入运行轨道,成为国际上首台在轨运行的冷原子钟。该冷原子钟运行时,冷原子在 MOT 中通过光学黏胶技术获得初速度后,两次穿过环形腔形成的微波场实现 Ramsey 干涉,并最终被探测。冷原子钟闭环锁定后的在轨频率稳定度达到 $3.0\times10^{-13} \tau^{-1/2}$ ^[37, 50]。中国科学院上海光机所也正在研制应用于卫

星导航系统的积分球冷原子钟 ISCAC。该钟在无氧铜柱形腔内表面镀银,圆柱腔同时起到了积分球漫反射冷却光和产生微波场的作用,微波腔工作在 TE_{011} 模式, Q 值达到 11 000^[42]。使用柱形谐振腔获得冷原子和微波作用的 Ramsey 条纹,并实现积分球冷原子钟的闭环锁定。目前该冷原子钟已完成了工程样机的研制,设计原理图和实物图如图 11 所示^[42],实现的 Ramsey 线宽为 20 Hz。将探测完的原子重新捕获后采样率达到 11 Hz,频率稳定度为 $5.4\times10^{-13} \tau^{-1/2}$,长期稳定度达到 2×10^{-15} ^[76]。

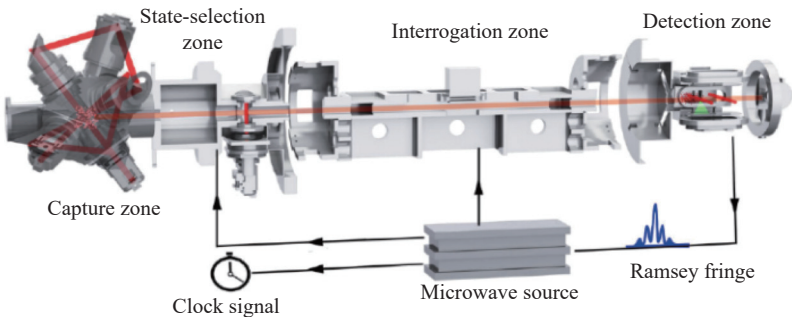


图 10 空间冷原子钟 CSAC 结构示意图
Fig. 10 Structure of the space cold atom clock CSAC

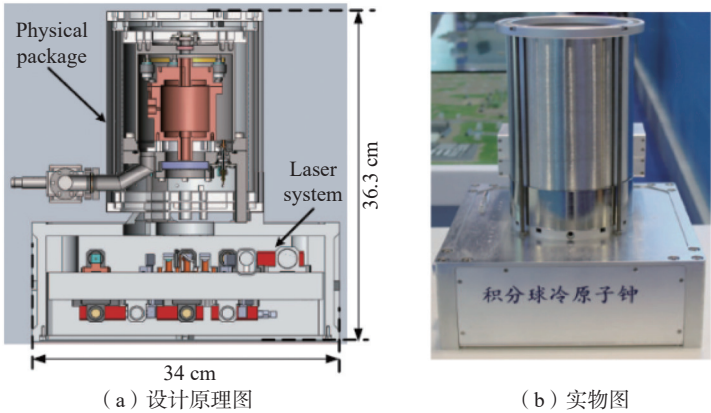


图 11 积分球冷原子钟
Fig. 11 The integrating sphere cold atom clock

4 总结与展望

冷原子钟具有频率稳定度好、准确度高等优势,但装置的复杂性和庞大的体积限制了冷原子钟的应用范围。国内外多家单位开展了冷原子钟小型化的研究,研制出了相关产品,有着广泛的应用前景。

目前冷原子钟结构都成功地大幅减小了装置的体积,在紧凑的区域内实现了冷原子干涉,并获得了高质量的钟信号测量结果。除巴黎天文台的 PHARAO 和中国科学院上海光机所 CSAC 两台原子钟需要将冷原子抛射外,其余小型化冷原子钟都是在微波腔内开展冷原子的制备、干涉与探测,运行过程中不需要对冷原子进行抛射,在很大程度上减小装置的体积。这种腔内冷原子制备技术可实现 MOT 和微波腔物理部分的一体化设计,简化系统的复杂度并减小整个装置的体积,满足星载原子钟体积小、质量轻的要求,为下一代卫星导航系统中高性能原子钟的开发研制奠定重要的技术基础。使用重捕获技术能够极大地缩短冷原子制备的死时间,冷原子钟的采样率提升近 1 个数量级,有效降低了 Dick 效应的影响^[77]。基于环隙结构的微波谐振腔,能够在确定的谐振频率下减小微波腔的体积,在微波腔上开设多个用于通光的圆孔时依然得到较高的 Q 值,满足冷原子钟小型化的实际工程需求。

基于 Ramsey 干涉的小型化冷原子钟未来将向着以下两个方向发展:

(1) 进一步提高冷原子钟在微重力环境下的性能。微重力环境是冷原子钟空间应用面临的独特环境,表现出区别于地面实验的特性,如冷原子的制备速度更快、温度也更低^[78]。更重要的是,从 MOT 释放的冷原子团在微重力环境下相对物理结构是静止的,干涉时间 T 可以从几十毫秒增加至秒量级,有效地压窄了 Ramsey 干涉条纹的线宽,更有利于高性能频标的获得,有望获得 $10^{-14}\tau^{-1/2}$ 的短期频率稳定度指标。我国已在国际上率先实现了冷原子钟的在轨运行,未来有望在卫星导航定位、深空探测等重大工程中发挥重要作用。

(2) 小型化冷原子钟向产品化发展。现有冷原子钟的体积最小仍有几十升,物理部分、光路系统等仍是限制冷原子钟体积的重要部分,小型化和集成化是未来冷原子钟的发展方向。国外已有多款商品化冷原子钟问世,但国内目前尚没有与之对标

的产品。因此,加快开展冷原子钟产品化的关键技术攻关、研制能够服务于国民经济的小型化冷原子钟具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王义遒,王庆吉,傅济时,等. 量子频标原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] ASHBY N, HEAVNER T P, JEFFERTS S R, et al. Testing local position invariance with four cesium-fountain primary frequency standards and four NIST hydrogen masers[J]. *Physical Review letters*, 2007, 98 (7): 070802.
- [3] JADUSZLIWER B, CAMPARO J. Past, present and future of atomic clocks for GNSS[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 1-13.
- [4] 胡春阳, 焦群. 电网时间统一系统可行性研究 [J]. *电力系统通信*, 2011, 32(1): 1-5.
- [5] RAMSEY N F. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields[J]. *Physical Review*, 1950, 78(6): 695.
- [6] FORMAN P. Atomichron®: the atomic clock from concept to commercial product[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(7): 1181-1204.
- [7] KASEVICH M A, RIIS E, CHU S, et al. RF spectroscopy in an atomic fountain[J]. *Physical Review letters*, 1989, 63 (6): 612-615.
- [8] CLAIRON A, SALOMON C, GUELLATI S, et al. Ramsey resonance in a Zacharias fountain[J]. *Europhys Letter*, 1991, 16 (2): 165.
- [9] CLAIRON A, LAURENT P, SANTARELLI G, et al. A cesium fountain frequency standard: preliminary results[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44 (2): 128-131.
- [10] CLAIRON A, GHEZALI S, SANTARELLI G, et al. The LPTF preliminary accuracy evaluation of cesium fountain frequency standard[C]//Tenth European Frequency and Time Forum EFTF 96 (IEE Conference Publication 418), 1996: 218-223.
- [11] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. *Metrologia*, 2014, 51 (3): 174.
- [12] GUENA J, ABGRALL M, ROVERA D, et al. Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59 (3): 391-410.
- [13] 史春艳, 魏荣, 李唐, 等. 高精度 10^{-15} 可搬运铷原子喷泉

- 钟的研制[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 611-619.
- [14] 刘春保. 国外空间原子钟发展研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(1): 123-129.
- [15] ESNAULT F X, HOLLEVILLE D, ROSSETTO N, et al. High-stability compact atomic clock based on isotropic laser cooling[J]. *Physical Review A*, 2010, 82 (3): 033436.
- [16] 李慧, 杜远博, 刘洪力, 等. 用于本地时标系统的铯原子喷泉钟研制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 23-29.
- [17] SANTARELLI G, LAURENT P, LEMONDE P, et al. Quantum projection noise in an atomic fountain: A high stability cesium frequency standard[J]. *Physical Review letters*, 1999, 82 (23): 4619.
- [18] MCGILLIGAN J P, MOORE K, DELLIS A, et al. Laser cooling in a chip-scale platform[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117 (5): 054001.
- [19] SITARAM A, ELGEE P K, CAMPBELL G K, et al. Confinement of an alkaline-earth element in a grating magneto-optical trap[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91 (10): 103202.
- [20] LEE K I, KIM J A, NOH H R, et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror[J]. *Optics Letters*, 1996, 21 (15): 1177-1179.
- [21] KIM J, LEE K, NOH H, et al. Atom trap in an axicon mirror[J]. *Optics Letters*, 1997, 22 (2): 117-119.
- [22] POLLOCK S, COTTER J P, LALIOTIS A, et al. Characteristics of integrated magneto-optical traps for atom chips[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13 (4): 043029.
- [23] POLLOCK S, COTTER J, LALIOTIS A, et al. Integrated magneto-optical traps on a chip using silicon pyramid structures[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14109-14114.
- [24] VANGELEYN M, GRIFFIN P F, RIIS E, et al. Single-laser, one beam, tetrahedral magneto-optical trap[J]. *Optics Express*, 2009, 17 (16): 13601-13608.
- [25] REICHEL J, HÄNSEL W, HÄNSCH T W. Atomic micromanipulation with magnetic surface traps[J]. *Physical Review letters*, 1999, 83(17): 3398-3401.
- [26] VANGELEYN M, GRIFFIN P F, RIIS E, et al. Laser cooling with a single laser beam and a planar diffractor[J]. *Optics Express*, 2010, 35 (20): 3453-3455.
- [27] NSHII C C, VANGELEYN M, COTTER J P, et al. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8 (5): 321-324.
- [28] LEWIS B, ELVIN R, ARNOLD A S, et al. A grating-chip atomic fountain[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121 (16): 164001.
- [29] DUAN J, LIU X, ZHOU Y, et al. High diffraction efficiency grating atom chip for magneto-optical trap[J]. *Optics Communications*, 2022, 513: 128087.
- [30] CHEN L, HUANG C J, XU X B, et al. Planar-integrated magneto-optical trap[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17 (3): 034031.
- [31] KETTERLE W, MARTIN A, JOFFE M A, et al. Slowing and cooling atoms in isotropic laser light[J]. *Physical Review letters*, 1992, 69 (17): 2483.
- [32] CHENG H D, ZHANG W Z, MA H Y, et al. Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light[J]. *Physical Review A*, 2009, 79 (2): 023407.
- [33] GUILLOT E, POTTIE P E, DIMARCO N. Three-dimensional cooling of cesium atoms in a reflecting copper cylinder[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(21): 1639-1641.
- [34] 黄秉英, 吴长华, 干云清, 等. 用于铯原子喷泉频率基准的 TE₀₁₁ 微波谐振腔[J]. 计量学报, 2002, 23(2): 157-160.
- [35] STEFANUCCI C, BANDI T, MERLI F, et al. Compact microwave cavity for high performance rubidium frequency standards[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 104706.
- [36] MÜLLER S T, MAGALHÃES D V, BEBEACHIBULI A, et al. Free expanding cloud of cold atoms as an atomic standard: Ramsey fringes contrast[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(6): 909-914.
- [37] LIU L, LU D S, CHEN W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ⁸⁷Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [38] BIAN F G, RONG W, JIANG H F, et al. A movable-cavity cold atom space clock[J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(7): 1645.
- [39] 王鹏, 闫泉喜, 赵杏文. 铷原子钟微波谐振腔的发展与应用[J]. 真空电子技术, 2023(1): 12-17.
- [40] 王新文, 高源慈, 赵剑波, 等. 空间冷原子钟原位探测微波腔设计[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 901006.
- [41] WANG X, CHENG H, ZHENG B, et al. Integrating sphere cold atom clock with cylindrical microwave cavity[C]// 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, 2011: 1-3.

- [42] LIU P, MENG Y, WAN J, et al. Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 062101.
- [43] 吴长江. 铯原子喷泉钟物理系统的研制 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (国家授时中心), 2012.
- [44] LEE S, CHOI G W, HONG H G, et al. A compact cold-atom clock based on a loop-gap cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(6): 064002.
- [45] BREGAZZI A, BATORI E, LEWIS B, et al. A cold-atom Ramsey clock with a low volume physics package[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 1629.
- [46] BATORI E, BREGAZZI A, LEWIS B, et al. An additive-manufactured microwave cavity for a compact cold-atom clock[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(22): 224401.
- [47] ESNAULT F X, PERRIN S, TRÉMINE S, et al. New design of the compact cold atoms clock HORACE[C]//Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum, 2006: 237-240.
- [48] TREMINE S, GUERANDEL S, HOLLEVILLE D, et al. Development of a compact cold atom clock[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2004: 65-70.
- [49] DUAN Y X, WANG B, XIANG J F, et al. State Preparation in a cold atom clock by optical pumping[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(7): 073201.
- [50] REN W, LI T, QU Q, et al. Development of a space cold atom clock[J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1828-1836.
- [51] REN W, SUN Y, WANG B, et al. Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3607-3614.
- [52] WANG Y, YE M, JIANG X, et al. Miniaturized optical system for a caesium satellite-borne cold atom clock[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 15(1): 1-7.
- [53] LAURENT P, ABGRALL M, JENTSCH C, et al. Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(4): 683-690.
- [54] LIENHART F, BOUSSEN S, CARRAZ O, et al. Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1 560 nm[J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2/3): 177-180.
- [55] MÉNORET V, GEIGER R, STERN G, et al. Dual-wavelength laser source for onboard atom interferometry[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4128-4130.
- [56] 王新文, 项静峰, 彭向凯, 等. 基于光纤激光放大倍频的冷原子钟光源 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0914002.
- [57] SALOMON C, DIMARCO N, ABGRALL M, et al. Cold atoms in space and atomic clocks: ACES[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics-Astrophysics*, 2001, 2(9): 1313-1330.
- [58] CACCIAPUOTI L, ARMANO M, MUCH R, et al. Testing gravity with cold-atom clocks in space: The ACES mission [J]. *The European Physical Journal D*, 2020, 74(8): 1-14.
- [59] ESNAULT F-X, ROSSETTO N, HOLLEVILLE D, et al. HORACE: A compact cold atom clock for Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 854-858.
- [60] MÜLLER S T, MAGALHÃES D V, ALVES R F, et al. Compact frequency standard based on an intracavity sample of cold cesium atoms[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(11): 2592-2596.
- [61] SHAH V, LUTWAK R, STONER R, et al. A compact and low-power cold atom clock[C]//2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, 2012: 1-6.
- [62] GIVON M, HABIB L, WAXMAN A, et al. In-vacuum microwave resonator for a compact cold atom frequency standard[J]. *ArXiv*: 2208.9038, 2022.
- [63] PELLE B, SZMUK R, DESRUELLE B, et al. Cold-atom-based commercial microwave clock at the 10^{-15} level[C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), 2018: 1-5.
- [64] PELLE B, ARCHAMBAULT L, DESRUELLE B, et al. Cold-atom-based commercial microwave clocks at 1×10^{-15} relative instability over more than one month[C]//2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2022: 1-4.
- [65] ASCARRUNZ F, DUDIN Y, ARAMBURO M C D, et al. A portable cold ^{87}Rb atomic clock with frequency instability at one day in the 10^{-15} range[C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), 2018: 1-3.
- [66] AOSense, Inc. Cold-atom Frequency Standard [EB/OL]. [2024-08-06]. <http://aosense.com/products/frequency-standards/cold-atom-frequency-standard/>.
- [67] 陈江, 李得天, 王骥, 等. 导航铯原子钟的发展现状及趋势 [J]. *国际太空*, 2016(4): 20-24.
- [68] 梅刚华, 赵峰, 祁峰, 等. 用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟特性 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*,

- 2021, 51(1): 114–120.
- [69] 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展 [J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 1–8.
- [70] 贺轩, 袁志超, 陈佳源, 等. 国产高性能光抽运小铯钟研制进展 [J]. 计测技术, 2023, 43(3): 99–106.
- [71] LIU D, RUAN J, FAN S, et al. Comparison with TAI of NTSC-F1[C]//2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF), 2020: 1–2.
- [72] SHI J R, WANG X L, BAI Y, et al. Evaluation of second-order Zeeman frequency shift in NTSC-F2[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(7): 070601.
- [73] FANG F, LI M, LIN P, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation[J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454–468.
- [74] 刘昆, 房芳. 基准微波原子钟 [J]. 物理, 2023, 52(7): 441–448.
- [75] 王秀梅, 何进, 王一非, 等. 积分球冷原子钟一体化激光冷却与探测微波腔研究 [J]. 时间频率学报, 2022, 45(2): 75–82.
- [76] YU M Y, MENG Y L, YE M F, et al. Development of the integrated integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(7): 070602.
- [77] SANTARELLI G, AUDOIN C, MAKDISSI A, et al. Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, 45(4): 887–894.
- [78] LÜ D S, REN W, SUN Y, et al. Characterization of laser cooling in microgravity via long-term operations in Tian-Gong-2 space lab[J]. *National Science Review*, 2023, 10(4): nwac180.

(责任编辑: 郭 云)