

引用格式: 卢晓同, 谭巍, 常宏. 国家授时中心光晶格钟研究进展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 40-49.

国家授时中心光晶格钟研究进展

卢晓同^{1,2,3}, 谭巍^{1,2,3}, 常宏^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 合肥国家实验室, 合肥 230088

摘要: 光晶格钟在近 20 年获得了飞速的发展, 其系统不确定度和稳定度均进入 10^{-19} 量级, 不仅是下一代“秒”定义的候选者之一, 还在相对论测地学、基础物理研究和量子模拟等领域扮演着重要角色。近年来, 中国科学院国家授时中心在光晶格钟领域取得了一系列突破性进展, 不仅将实验室光晶格钟的系统不确定度降低至 1.96×10^{-18} , 成为当前国内指标最先进的光晶格钟之一, 还首次在空间站上实现了 ^{87}Sr 光晶格原子的一级激光冷却。综述了国家授时中心光晶格钟研究进展, 包括实验室 ^{87}Sr 光晶格钟的研究历程和最新进展、基于弗洛凯设计的光晶格钟的核心技术和研究成果, 以及空间 ^{87}Sr 光晶格钟关键技术和最新成果。

关键词: 光晶格钟; 光钟; 空间光钟; 光学频率标准

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0040-10

Progress on optical lattice clocks at the National Time Service Center

LU Xiao-tong^{1,2,3}, TAN Wei^{1,2,3}, CHANG Hong^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China

Abstract: Optical lattice clocks have achieved rapid progress over the past two decades, with both systematic uncertainty and stability reaching the 10^{-19} level. They are not only one of the leading candidates for the next-generation definition of the “second”, but also play a significant role in fields such as relativistic geodesy, fundamental physics, and quantum simulations. Recently, the National Time Service Center (NTSC) of Chinese Academy of Sciences has made a series of groundbreaking advancements in the field of optical lattice clocks. These include the first-ever laser cooling of ^{87}Sr atoms to the primary stage in a space station environment, as well as reducing the systematic uncertainty of a laboratory optical lattice clock to 1.96×10^{-18} , ranking it among the top-performing optical lattice clocks currently available in China. This paper reviews the research progress of optical lattice clocks at NTSC, encompassing the development history and latest achievements of the laboratory ^{87}Sr optical lattice clock, the core technologies and research outcomes of the Floquet-engineering optical lattice clock, as well as the key technologies and recent results of the space-based ^{87}Sr optical lattice clock.

Keywords: optical lattice clock; optical clock; space optical clock; optical frequency standard

收稿日期: 2025-07-22; 接受日期: 2025-09-07

基金项目: 中国科学院重大科技基础设施运行与维护(2024000014); 创新人才推进计划-陕西省青年科技新星(2025ZC-KJXX-112)

作者简介: 卢晓同, 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学原子钟研究。

光钟作为下一代时间频率标准^[1],其利用原子或离子的光频跃迁作为参考(其频率比微波波段高出 4 个数量级以上),具备极高的稳定性和不确定度,在基础物理研究、深空导航、量子信息科学以及相对论大地测量等领域展现出巨大的应用潜力^[1-2]。

光钟主要包括基于单个或多个囚禁离子的离子光钟和基于光晶格囚禁大量中性原子的光晶格钟。描述光钟性能的最主要指标包括稳定性和不确定度,二者分别表征光钟输出信号在时域上的波动程度和系统频移的校准误差。近 20 年来,光钟的稳定性和不确定度均实现了跨越式提升,表 1 列出

了当前(截至 2025 年 7 月)世界各国已实现光钟的最低系统不确定度和最优稳定度。当前综合性能最优的离子光钟和光晶格钟均由美国——国家标准与技术研究院(NIST)^[3]研制的²⁷Al⁺光钟,实现了 $3.5\times10^{-16}(\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度和 5.5×10^{-19} 的系统不确定度;实验天体物理联合研究所(JILA)研制的⁸⁷Sr 光晶格钟实现了 $4.8\times10^{-17}(\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度^[4]和 8.1×10^{-19} 的系统不确定度^[5]。尽管离子光钟的系统频移项比光晶格钟少且大多对黑体辐射频移不敏感,更容易实现低的系统不确定度,但其稳定度受限于量子投影噪声而难以超越光晶格钟。

表 1 世界各国光钟性能指标

国家	不确定度		稳定度 $(\tau/\text{s})^{-0.5}$	
	离子光钟	光晶格钟	离子光钟	光晶格钟
美国	$5.5\times10^{-19[3]}$	$8.1\times10^{-19[4]}$	$3.5\times10^{-16[3]}$	$4.8\times10^{-17[5]}$
中国	$1.6\times10^{-18[6]}$	$1.96\times10^{-18[7]}$	$2.5\times10^{-15[8]}$	$3.6\times10^{-16[7]}$
德国	$2.5\times10^{-18[9]}$	$3\times10^{-18[10]}$	$9.2\times10^{-16[9]}$	$5\times10^{-17[11]}$
日本	$5\times10^{-16[12]}$	$5.5\times10^{-18[13]}$	$1.7\times10^{-13[12]}$	$8\times10^{-16[14]}$
英国	$2.2\times10^{-18[15]}$	$1\times10^{-17[16]}$	$3.1\times10^{-15[15]}$	$4.8\times10^{-15[16]}$
法国	—	$4.1\times10^{-17[17]}$	—	$1.7\times10^{-15[17]}$
韩国	—	$1.7\times10^{-17[18]}$	—	$3.2\times10^{-15[18]}$
加拿大	$1.14\times10^{-17[19]}$	—	$3\times10^{-15[19]}$	—
意大利	—	$1.9\times10^{-17[20]}$	—	$1\times10^{-15[20]}$

近年来,国内许多研究机构也相继开展光钟的研制工作并取得了瞩目的成果,中国科学院国家授时中心(NTSC)^[7]研制的⁸⁷Sr 光晶格钟实现了 $3.6\times10^{-16}(\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度和 1.96×10^{-18} 的系统不确定度;中国科学技术大学(USTC)^[21]研制的⁸⁷Sr 光晶格钟实现了 $2.3\times10^{-16}(\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度和 9.2×10^{-19} 的系统不确定度;中国计量科学研究院(NIM)研制的⁸⁷Sr 光晶格钟实现了 $1.18\times10^{-15}(\tau/\text{s})^{-0.5[22]}$ 的稳定度和 6.5×10^{-18} 的系统不确定度^[23];华中科技大学(HUST)^[6]研制的²⁷Al⁺光钟实现了 $2.6\times10^{-15}(\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度和 1.6×10^{-18} 的系统不确定度;中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(IAPMST)研制的⁴⁰Ca⁺光钟实现了 $2.5\times10^{-15}(\tau/\text{s})^{-0.5[8]}$ 的稳定度和 4.4×10^{-19} 的系统不确定度^[24]。本文从实验室光晶格钟、基于弗洛凯设计的光晶格钟和空间光晶格钟三个方面综述了国家授时中心光晶格钟研究进展。

1 国家授时中心实验室光晶格钟

由于铯原子具备易于用半导体激光冷却至微开尔文量级、“魔术波长”容易获取且激发态寿命长等优点,科研人员在早期便选择铯元素研制光晶格钟。铯在自然界中存在 4 种稳定的同位素——⁸⁴Sr、⁸⁶Sr、⁸⁷Sr 和⁸⁸Sr,它们的丰度分别为 0.56%、9.86%、7%和 82.58%。国家授时中心自 2008 年开始研制铯原子光晶格钟,并从能级结构较为简单且丰度最大的⁸⁸Sr 光晶格钟入手,积累实验和理论经验。在 2015 年成功实现了⁸⁸Sr 光晶格钟的闭环运行,随后转而研制精度更高的⁸⁷Sr 光晶格钟。2017 年,国家授时中心第一台⁸⁷Sr 光晶格钟(SrI)实现了闭环运行^[25]。SrI 的物理装置如图 1 所示,其俘获原子的一维光晶格只能沿垂直于重力加速度方向搭建,因此无法工作在浅光晶格区域。同时,原子所处环境温度也只能通过测量真空腔体表面温度来粗略估计,黑体辐射频移的评估不确定度为 4.4×10^{-17} 。2023 年,

国家授时中心的 SrI 光晶格钟完成了系统不确定度评估,其系统不确定度达到了 5.1×10^{-17} ;将钟跃迁谱线的半高全宽减小至 $0.59(5)$ Hz,通过自比对技术确定系统稳定度为 $6.6 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5[26]}$ 。此外,通过与国家授时中心守时氢钟比对的方式溯源至国际原子时,确定 SrI 光晶格钟的钟跃迁频率为 $429\,228\,004\,229\,872.91(18)$ Hz,相对测量不确定度为 $4.1 \times 10^{-16[26]}$ 。

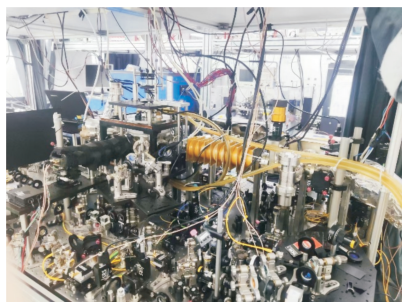


图1 国家授时中心第一台 ^{87}Sr 光晶格钟(SrI)物理装置

由于 SrI 光晶格钟物理装置的设计导致其难以将系统不确定度降低至 10^{-18} 量级,为此国家授时中心从 2023 年开始研制第二台 ^{87}Sr 光晶格钟(SrII),其物理装置如图 2 所示,主真空腔体内部结构如图 3 所示。SrII 光晶格钟装置设计具有以下特点。

① 物理系统放置在一个可以旋转的平台上,通过调整平台的倾角可以改变光晶格与重力加速度方向的夹角以及冷原子所处位置的高度。

② 主真空腔体内部设计有一个纯铜制作的热屏蔽腔,其温度通过两个精密校准过的薄膜铂电阻测量;一个四阶帕尔贴与热屏蔽腔底部接触,用于控制热屏蔽腔的温度。

③ 主真空腔体上的透光窗口片,在靠近内真空侧蒸镀有氧化铟锡(ITO)导电透光薄膜,该薄膜与真空腔体导通,可以避免杂散电荷在窗口片上积累。

④ 极化光沿塞曼减速光方向入射,将原子制备至 $|m_F|=9/2$ 塞曼子能级。两束偏振方向正交的线偏振极化光合束后进入同一根保偏光纤,通过半波片和 $1/4$ 波片将两束极化光的偏振分别调整为左旋和右旋圆偏振。通过切换两束极化光可以灵活地控制原子初态制备。这种设计可以避免使用液晶波片和切断极化光反射光的机械开关,可简化实验装置、提高初态制备效率。

调整平台使光晶格与重力加速度存在一个倾角可以形成 Wannier-Stark 晶格 $^{[4,27-30]}$,抑制原子在相邻格点间发生隧穿的概率,使光晶格钟可以运行

在浅光晶格区域;主动控温的热屏蔽腔可以为原子提供均匀的热辐射环境,有效避免真空腔体、原子炉和室温导致的黑体辐射频移;ITO 镀膜的窗口片可以从根本上避免杂散电荷在窗口片上积累导致的直流斯塔克频移 $^{[31-32]}$ 。这些系统优化大幅度降低了黑体辐射频移、晶格光交流斯塔克频移和密度频移等系统主要频移项的不确定度,为总系统不确定度进入 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级奠定了基础。

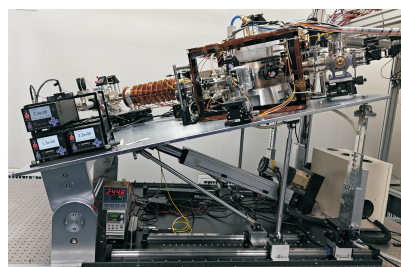


图2 国家授时中心第二台 ^{87}Sr 光晶格钟(SrII)物理装置

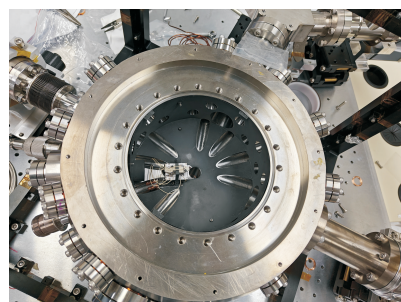
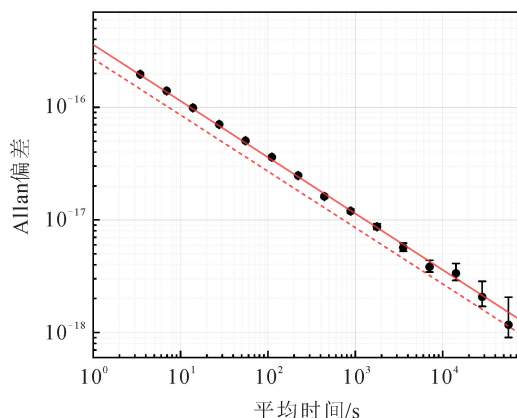


图3 SrII 光晶格钟主真空腔体内部结构图

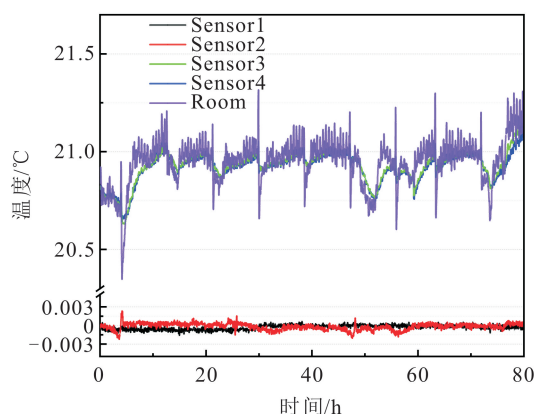
SrII 光晶格钟的冷原子制备时间可以缩短至 0.5 s 以内,结合频率闪烁噪声为 4×10^{-16} 的钟激光系统,使钟跃迁探测的占空比可达 50% ,且钟周期小于 1 s。这些改进使得 SrII 光晶格钟的稳定度达到了 $3.6 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$,且经过 $56\,000$ s 的平均后达到了 1.2×10^{-18} (如图 4 所示) $^{[7]}$ 。



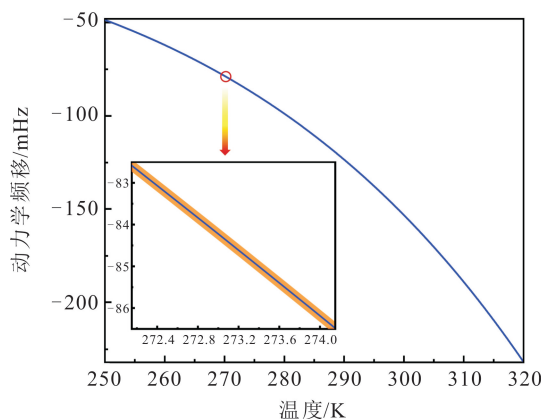
注:实线为对数据线性拟合的结果,斜率固定为 -0.5 ,
虚线对应实验参数下狄克噪声限制的稳定性

图4 SrII 光晶格钟稳定度测量结果 $^{[7]}$

当前主导光晶格钟黑体辐射频移的不确定度的主要因素是原子所处环境的温度和动态黑体辐射频移修正系数(限制室温下 Sr 原子/离子、Yb 原子/离子和 Ca^+ 光钟等黑体辐射不确定度进入 10^{-19} 量级的主要因素)。最近, JILA 光晶格钟研究团队通过精密测量 ^{87}Sr 原子 $5s4d^3D_1$ 态寿命^[4], 大幅度降低了 ^{87}Sr 动态黑体辐射频移修正系数的不确定度。然而, 动态黑体辐射频移修正系数与原子所处环境的温度有关, 对于 Sr II 光晶格钟而言, 热屏蔽的温度被控制在 273.15 K 附近(如图 5(a)所示), 需要重新计算动态黑体辐射频移, 计算结果如图 5(b)所示。通过移动光晶格技术将原子移动至热屏蔽腔进行钟跃迁探测, 原子距离出口约 10.5 mm 时(热屏蔽腔通光小孔的直径为 1 mm), 主真空腔体和室温黑体辐射光子导致的黑体辐射频移不确定度在 1×10^{-19} 量级。结合 10 mK 的热屏蔽腔温度测量不确定度和精确计算的动态黑体辐射频移修正系数, Sr II 光晶格钟黑体辐射频移评估的总不确定度被降低至 7×10^{-19} 。



(a) Sr II 光晶格钟热屏蔽腔温度 (Sensor1 和 Sensor2)、主真空腔体温度 (Sensor3 和 Sensor4) 和室温检测 (Room)



注: 插图 273.15 K 附近动力学黑体辐射频移的细节图

(b) 动态黑体辐射频移评估

图 5 原子周围温度测量与动力学黑体辐射频移评估^[17]

Sr II 光晶格钟的晶格光交流斯塔克频移、密度频移和二阶塞曼频移等系统频移项均完成了详细的评估, 结果如表 2 所示, 总不确定度被确定为 1.96×10^{-18} ^[7]。当前限制系统不确定度进入 10^{-19} 量级的主要因素是晶格光交流斯塔克频移, 未来通过降低光晶格的阱深至 $10E_r$ (E_r 为晶格光子反冲能量), 可进一步减小 Sr II 光晶格钟的系统不确定度。

表 2 Sr II 光晶格钟系统不确定度评估^[4] 单位: 10^{-18}

频移项	频移量	不确定度
黑体辐射频移	-3 608.59	0.7
晶格光交流斯塔克频移	-0.41	1.56
密度频移	-5.43	0.48
背景气体碰撞频移	-6.38	0.64
一阶塞曼频移	0	<0.1
二阶塞曼频移	-86.68	0.11
一阶多普勒频移	0	0.5
直流斯塔克频移	0	<0.1
隧穿频移	0	<0.1
线牵引频移	0	<0.1
伺服误差	0	0.12
钟激光交流斯塔克频移	0	<0.1
声光调制器相位啁啾频移	0	<0.1
汇总	-3 707.49	1.96

2 基于弗洛凯设计的光晶格钟

为了实现高精度的光晶格钟, 除了尽可能减小黑体辐射频移外, 还需要着重减小晶格光交流斯塔克频移和密度频移, 而降低光晶格的阱深是实现这一目标的最有效手段。然而, 当阱深降低时, 原子在格点之间的隧穿几率增加, 进而导致退相干和潜在的系统频移。在地面环境中, 可以通过将光晶格沿重力加速度方向搭建的办法形成 Wannier-Stark 晶格, 通过重力加速度破坏光晶格平移对称性的办法抑制原子在格点间的隧穿几率。然而, 此项技术无法应用于工作在微重力环境的光钟。因此, 国家授时中心光晶格钟研制团队研发了通过弗洛凯设计调控系统有效哈密顿量抑制浅光晶格里的隧穿几率的技术^[33]。

对于光晶格而言, 被囚禁原子的外态哈密顿量可以用紧束缚模型描述:

$$\hat{H}_{\text{ext}} = -J \sum_n |\omega_{n+1}\rangle \langle \omega_n| + |\omega_n\rangle \langle \omega_{n+1}|. \quad (1)$$

式(1)中, J 是原子在相邻格点间的跃迁强度, 而 $|\omega_n\rangle$ 是局域在第 n 号格点的瓦尼尔态。当形成光晶格是通过两束频率可独立调节的晶格光干涉形成时,

对其中一束晶格光的频率施加周期调制 $\Delta v_p(t)$, 光晶格将带动原子以速度 $v(t) = 0.5\lambda_L \Delta v_p(t)$ 做周期性运动, 其中 λ_L 为晶格光波长。此时, 原子会感受到一个周期性的等效力场 $F(t) = m dv(t)/dt$ (m 表示原子质量)。通过规范变换后, 含时系统的外态哈密顿量可以被表示为^[33]

$$\hat{H}_{\text{ext}} = - \sum_n J e^{-\frac{i}{\hbar} \int_0^t F(\tau) d\tau \frac{\lambda_L}{2}} (|w_{n+1}\rangle \langle w_n| + |w_n\rangle \langle w_{n+1}|) - F(t) \frac{\lambda_L}{2} \sum_n n |w_n\rangle \langle w_n| \quad (2)$$

可见原子隧穿几率被 $e^{-\frac{i}{\hbar} \int_0^t F(\tau) d\tau \frac{\lambda_L}{2}}$ 项调控, 即可以通过弗洛凯调制控制原子在格点间的跃迁几率, 当这一项为零时, 隧穿几率为零, 即所谓的动力学局域化。当调制波形为三角波时, 即 $v(t) = 0.5\lambda_L v_a (1 - 4|\text{Mod}[t, 1/v_s] - 0.5|)$, 其中 $\text{Mod}[t, 1/v_s]$ 表示对时间 t 除以 $1/v_s$ 的商取余, v_a 为调制幅度, v_s 为调制频率, 有:

$$\frac{w_s}{2\pi} \int_0^{2\pi/w_s} e^{-\frac{i}{\hbar} \int_0^t F(\tau) d\tau \frac{\lambda_L}{2}} dt = \text{Sinc} \left[\pi \frac{v_a}{4v_{\text{rec}}} \right] \quad (3)$$

式(3)中辛格函数 $\text{Sinc}[x] = \sin(x)/x$, $v_{\text{rec}} = h/(2\lambda_L M)^2$ 为晶格光子反冲频率, $h = h/2\pi$ 为普朗克常数。这就意味着当调制幅度 v_a 为 $4v_{\text{rec}}$ 的整数倍时, 原子在光晶格里面的隧穿效应将被完全抑制。

图6给出了三角波调制下, 初始外态分别为 $n_z=0$ 和 $n_z=1$ 时钟跃迁谱线范霍夫奇点 (Van Hove singularity, VHS) 间距与调制幅度的关系, 其中调制频率固定为 600 Hz。范霍夫奇点间距与隧穿几率成正比, 当隧穿被完全抑制时, 范霍夫奇点间距为零。可见三角波调制可以同时抑制不同外态的隧穿几率。为了进一步证明弗洛凯设计可以在不同阱深下完全消除隧穿导致的谱线展宽和退相干, 需要在长钟探测时间和浅光晶格条件下, 对比钟跃迁谱线线宽与傅里叶极限线宽, 如图7所示。实验结果与理论计算均表明, 通过弗洛凯设计可以完全抑制浅光晶格里的原子隧穿效应, 即便晶格阱深低至 $7.2 E_r$ 仍能实现有效抑制。

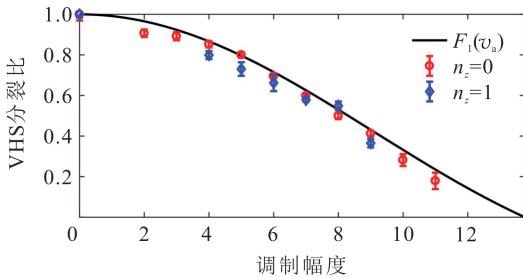


图6 不同调制幅度 v_a 下归一化范霍夫奇点 (VHS) 频率劈裂间距^[33]

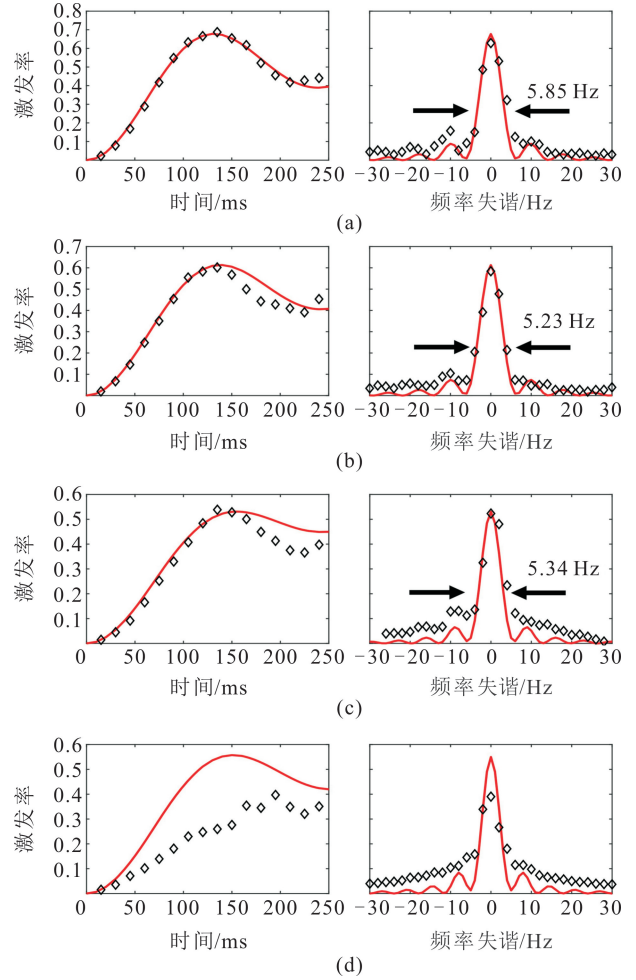


图7 浅晶格下的拉比振荡(左)与拉比谱线(右)^[33]

图7中, 调制幅度 $v_a = 13.7644 \text{ kHz}$, 调制频率 $v_s = 600 \text{ Hz}$ 和裸态拉比频率 $g_0 = 21 \text{ Hz}$ 。图7(a)~(d)各自的阱深分别为 $23E_r$ 、 $15.1E_r$ 、 $9.1E_r$ 和 $7.2E_r$; 钟探测时间分别为 135 ms、135 ms、150 ms 和 150 ms。红色实线分别为根据实验参数理论计算获得拉比振荡(边)和拉比谱线(边)。

3 空间光晶格钟

由于光钟本身的精度极高, 21 世纪初, 世界多个科技强国相继提出研制空间光钟的战略目标^[34-37]。在地球表面运行的光钟的绝对频率会受到固体潮、海潮、湖泊潮等地面引力势变化导致的频率漂移, 漂移幅度约为每年 10^{-18} 量级^[34]。这个漂移对不确定度已经达到 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级的光钟来说是破坏性的。而对于空间光钟, 轨道微重力环境将大幅度降低引力频移。另一方面, 通过星-星或者星-地连接几台空间光钟建立超高精度的时频参考体系, 将对深空导航产生革命性影响。此

了集成化的原子荧光探测光路、小型化的 MOT 腔、MOT 线圈以及真空腔外围原子俘获和探测光路的集成化设计。

空间光钟原理样机是实现空间光钟的重要一环,其装置如图 9 所示,搭建的外围框架尺寸参考空间光钟对系统的尺寸要求。光钟原理样机可实现 3.8×10^6 个蓝 MOT 原子俘获,温度约为 5 mK;实现 3.5×10^5 个红 MOT 原子俘获,测得原子温度约为 4 μ K,装载到晶格的原子约为 2×10^4 个,通过边带可分辨的钟跃迁谱拟合可得轴向原子温度约为 3.4 μ K。基于 180 ms 的钟探测,可以实现线宽约为 5 Hz,激发率为 0.8 的钟跃迁探测谱线。

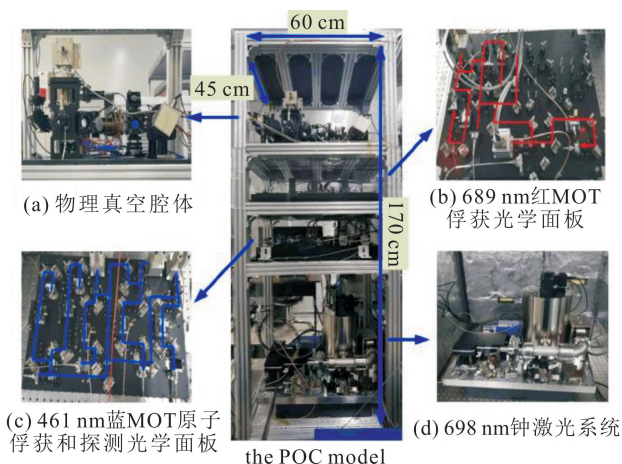


图 9 空间光钟原理样机的组成^[39]

空间光钟原理样机闭环运行后,积分时间达到 3 000 s 时可以实现 3.3×10^{-17} 稳定度,稳定度下降趋势满足 $2.6 \times 10^{-15} (\tau/s)^{-0.5}$ 。通过标准方法评估了系统的主要频移项,其中黑体辐射频移不确定度为 6.3×10^{-17} ,碰撞频移不确定度为 4.2×10^{-17} ,系统的综合不确定度为 5.7×10^{-17} ^[39]。

空间光钟从原理样机的转化到正样飞行件的研制经历了系统性的工程化设计和满足发射要求的产品性能测试。最终发射的空间光钟飞行件分为光钟物理单元、光钟光学单元和光钟电控单元三个箱体,功能和原理样机一致。其中,最大的箱体长宽高分别为 588 mm,465 mm 和 415 mm,最重的箱体质量为 66.6 kg。三个箱体的总体积为 306 L,总质量为 163.8 kg。图 10 为空间光钟三个单元的外观实物图。飞行件产品可以满足 17~40 Hz 最大 3.4 g 的力学振动,满足 10~40 $^{\circ}\text{C}$ (3~5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) 的温度变化,从而满足产品从运输、发射到入轨过程中的苛刻环境要求。另外,由于光钟物理单元内在

真空腔体上安装了吸气剂泵,物理单元可以在断电 45 d 后,仍能正常启动离子泵维持真空,且在开机 30 min 后真空度达到理想值。

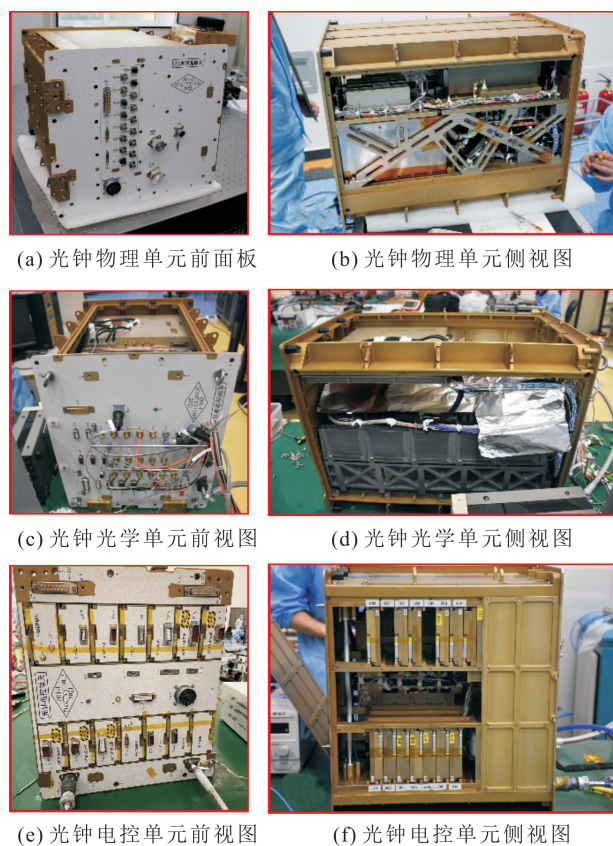


图 10 空间光钟的外观实物图

空间微重力环境下,设备产生的热量会环绕在热源周围并逐步累积。在空间光钟内,在光学面板中安装了导热铜管,将激光器和声光调制器产生的热量传递到液冷板上,再导出到液冷循环机。物理单元内部产热用石墨导热带将热量快速导出到冷板。电控单元内的电路模块至少有一个面与冷板接触,保证整个单元的散热。液冷板的流速可以达到 100 L/h,入水口的液体温度控制在 $(23 \pm 0.5) ^{\circ}\text{C}$ 。

在空间光钟安装到射频实验柜后,通过地面测试囚禁在晶格中的原子数目可以达到 1.4×10^4 个,晶格原子的寿命为 3.6 s,完全可以满足钟跃迁的探测。在物理真空腔体用于晶格原子俘获的部分使用了磁屏蔽罩与外界磁场隔离。磁屏蔽罩将外界的磁场衰减了约 120 倍,因此光钟的位置对原子的强度几乎没有影响。

空间光钟在轨运行后,完全依靠地面发送指令(集)操作光钟运行,无需航天员操作。应用载荷运控中心是空间光钟调试和数据记录的终端,应用载

荷运控和空间站运控中心与地面站通过光纤网络连接。地面站通过微波与天星通信卫星通讯,而部署在地球同步轨道的天星卫星覆盖空间站飞行的区域,实现与空间站通信。通过此链路实现指令的发送和下行数据的传输。

2025年初,在运控中心通过指令控制空间光钟,先后完成了激光器波长调优、激光器波长锁定、锶原子荧光光谱探测并实现了蓝 MOT 原子的激光冷却(如图 11 所示),这是迄今为止,世界上首次在空中环境实现碱土金属原子的激光冷却^[40]。

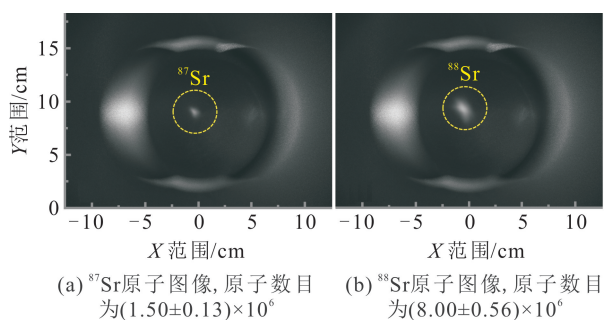


图 11 空间光钟在轨测试中俘获到的蓝 MOT 原子图像(虚线圈内)^[40]

4 结语

本文综述了国家授时中心光晶格钟研究进展,着重阐述了第二套锶原子光晶格钟的系统设计和不确定度评估,以及通过弗洛凯设计抑制浅光晶格里的隧穿效应,为研制高性能空间光钟奠定基础。最后介绍了国家授时中心在空间光钟研制方面的贡献,包括空间光钟的研究意义和技术路线、空间光钟原理样机的研制和在轨运行的空间站光钟的最新成果。

当前光晶格钟的系统不确定度主要受限于黑体辐射频移、晶格光交流斯塔克频移和密度频移。未来可以通过低温热屏蔽技术降低黑体辐射频移的系统不确定度。另一方面,将光晶格钟运行在浅光晶格区域,可以同时降低晶格光交流斯塔克频移和密度频移。同时采用这两种措施有望将地面光晶格钟的系统不确定度降低至 5×10^{-19} 量级以下。结合弗洛凯设计、浅光晶格和低温热屏蔽技术,下一代空间站光晶格钟系统不确定度也有望进入 10^{-19} 量级。

随着光钟性能高出铯喷泉钟两个数量级以上,国际计量委员会(CIPM)在 2018 年通过了光学“秒”定义变更的决议,并提出了 5 个具有里程碑意义的

要求^[41]。在全世界光钟研究团队的共同努力下,这些具有里程碑意义的要求目前已经实现过半^[1]。然而,目前阻碍光学“秒”定义变更进程的最大因素是光钟比对的一致性问题,特别是最新的结果显示,日本理化学研究所和英国国家物理实验室的⁸⁷Sr 光晶格钟之间存在超过 5×10^{-17} 的相对频率差异,超过了其预计测量误差的 2 倍^[42]。因此,探寻光钟比对频率差异的来源将是未来工作的重点之一。国家授时中心也将继续致力于研制更高精度的光晶格钟并将其真正用于时间基本单位“秒”的重新定义。

参考文献:

- [1] DIMARCQ N, GERTSVOLF M, MILETI G, et al. Roadmap towards the redefinition of the second[J]. Metrologia, 2024, 61(1): 012001.
- [2] YE J, ZOLLER P. Quantum sensing with atomic, molecular, and optical platforms for fundamental physics[J]. Physical Review Letters, 2024, 132(19): 190001.
- [3] MARSHALL M C, CASTILLO D A R, ARTHUR-DWORSCHACK W J, et al. High-stability single-ion clock with 5.5×10^{-19} systematic uncertainty [J]. Physical Review Letters, 2025, 135(3): 033201.
- [4] MA Z Y, DENG K, WANG Z Y, et al. Quantum-logic-based $^{25}\text{Mg}^+ - ^{27}\text{Al}^+$ optical frequency standard for the redefinition of the SI second [J]. Physical Review Applied, 2024, 21(4): 044017.
- [5] AEPPLI A, KIM K, WARFIELD W, et al. Clock with 8×10^{-19} systematic uncertainty [J]. Physical Review Letters, 2024, 133(3): 023401.
- [6] LU X T, GUO F, LIU Y Y, et al. NTSC SrII optical lattice clock with uncertainty of 2×10^{-18} [J]. Metrologia, 2025, 62(3): 035007.
- [7] HAUSSE H N, KELLER J, NORDMANN T, et al. $^{115}\text{In}^+ - ^{172}\text{Yb}^+$ Coulomb crystal clock with 2.5×10^{-18} systematic uncertainty [J]. Physical Review Letters, 2025, 134(2): 023201.
- [8] FILZINGER M, DÖRSCHER S, LANGE R, et al. Improved limits on the coupling of ultralight bosonic dark matter to photons from optical atomic clock comparisons [J]. Physical Review Letters, 2023, 130(25): 253001.
- [9] OHTSUBO N, LI Y, NEMITZ N, et al. Frequency ratio of an $^{155}\text{In}^+$ ion clock and a ^{87}Sr optical lattice clock [J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 5950-5953.
- [10] TAKAMOTO M, USHIJIMA I, OHMAE N, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks [J]. Nature Photonics, 2020, 14(7):

- 411-415.
- [11] TOFFUL A, BAYNHAM C F A, CURTIS E A, et al. $^{171}\text{Yb}^+$ optical clock with 2.2×10^{-18} systematic uncertainty and absolute frequency measurements [J]. *Metrologia*, 2024, 61(4):045001.
- [12] HOBSON R, BOWDEN W, VIANELLO A, et al. A strontium optical lattice clock with 1×10^{-17} uncertainty and measurement of its absolute frequency [J]. *Metrologia*, 2020, 57(6):065026.
- [13] LODEWYCK J, BILICKI S, BOOKJANS E, et al. Optical to microwave clock frequency ratios with a nearly continuous strontium optical lattice clock [J]. *Metrologia*, 2016, 53(4):1123-1130.
- [14] KIM H D, HEO M S, PARK C Y, et al. Absolute frequency measurement of the ^{171}Yb optical lattice clock at KRISS using TAI for over a year [J]. *Metrologia*, 2021, 58(5):055007.
- [15] MARCEAU C, BEATTIE S, KATO K, et al. Absolute frequency measurement of a $^{88}\text{Sr}^+$ clock by direct comparison to a primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2025, 62(4):045001.
- [16] GOTI I, CONDIO S, CLIVATI C, et al. Absolute frequency measurement of a Yb optical clock at the limit of the Cs fountain [J]. *Metrologia*, 2023, 60(3):035002.
- [17] OELKER E, HUTSON R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(10):714-719.
- [18] ZHANG B L, HUANG Y, HAO Y M, et al. Improvement in the stability of a $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock using the Ramsey method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(14):143105.
- [19] SCHWARZ R, DÖRSCHER S, AL-MASOUDI A, et al. Long term measurement of the ^{87}Sr clock frequency at the limit of primary Cs clocks [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3):033242.
- [20] NEMITZ N, OHKUBO T, TAKAMOTO M, et al. Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(4):258-261.
- [21] JIA Z P, LI J, KONG D Q, et al. Improved systematic evaluation of a strontium optical clock with uncertainty below 1×10^{-18} [J]. *Metrologia*, 2026, 63(2):025002.
- [22] LU B K, SUN Z, YANG T, et al. Improved evaluation of BBR and collisional frequency shifts of NIM-Sr2 with 7.2×10^{-18} total uncertainty [J]. *Chinese Physics Letters*, 2022, 39(8):080601.
- [23] LIAO T Y, LIU H, MENG F, et al. Remote comparison of two Sr optical lattice clocks through a 58 km fiber link [J]. *Chinese Physics Letters*, 2025, 42(3):034201.
- [24] ZHANG B L, MA Z X, HUANG Y, et al. Liquid-Nitrogen-cooled $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock with a systematic uncertainty of 4.4×10^{-19} [J]. *Physical Review Letters*, 2026, 136(5):053202.
- [25] WANG Y B, YIN M J, REN J, et al. Strontium optical lattice clock at the National Time Service Center [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2):023701.
- [26] LU X T, GUO F, WANG Y B, et al. Absolute frequency measurement of the ^{87}Sr optical lattice clock at NTSC using international atomic time [J]. *Metrologia*, 2023, 60(1):015008.
- [27] LEMONDE P, WOLF P. Optical lattice clock with atoms confined in a shallow trap [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(3):033409.
- [28] KIM K, AEPPLI A, BOTHWELL T, et al. Evaluation of lattice light shift at low 10^{-19} uncertainty for a shallow lattice Sr optical clock [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(11):113203.
- [29] AEPPLI A, CHU A J, BOTHWELL T, et al. Hamiltonian engineering of spin-orbit-coupled fermions in a Wannier-Stark optical lattice clock [J]. *Science Advances*, 2022, 8(41):eadc9242.
- [30] BOTHWELL T, KENNEDY C J, AEPPLI A, et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample [J]. *Nature*, 2022, 602(7897):420-424.
- [31] LODEWYCK J, ZAWADA M, LORINI L, et al. Observation and cancellation of a perturbing dc Stark shift in Strontium optical lattice clocks [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(3):411-415.
- [32] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level [J]. *Nature*, 2018, 564(7734):87-90.
- [33] YIN M J, LU X T, LI T, et al. Floquet engineering Hz-level Rabi spectra in shallow optical lattice clock [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(7):073603.
- [34] SCHILLER S, GÖRLITZ A, NEVSKY A, et al. Optical clocks in space [J]. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 2007, 166:300-302.
- [35] MALEWAR A. DARPA's ROCKN program aims to create portable optical atomic clocks [EB/OL]. (2022-10-02) [2025-07-21]. <https://www.inceptivemind.com/darpas-rockn-program-aims-create-portable-optical-atomic-clocks/23132/>.
- [36] BONGS K, SINGH Y, SMITH L, et al. Development of

- a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 553-564.
- [37] ORIGLIA S, SCHILLER S, PRAMOD M S, et al. Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS[C]//*Proceedings of SPIE, Brussels; The International Society for Optical Engineering(SPIE)*, 2016, 9900, 3.
- [38] ORIGLIA S, PRAMOD M S, SCHILLER S, et al. Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053443.
- [39] GUO F, TAN W, ZHOU C H, et al. A proof-of-concept model of compact and high-performance ^{87}Sr optical lattice clock for space[J]. *AIP Advances*, 2021, 11(12): 125116.
- [40] ZHAO G D, XIA J, LIU Y, et al. Laser cooling Alkali-earth atoms for optical clock in Chinese Space Station[J]. *Chinese Physics Letters*, 2025, 42(6): 063701.
- [41] RIEHLE F, GILL P, ARIAS F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 188-200.
- [42] AMY-KLEIN A, BENKLER E, BLONDÉ P, et al. International comparison of optical frequencies with transportable optical lattice clocks[EB/OL]. (2024-10-31)[2025-04-10]arXiv: 2410. 22973v1. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.22973>.